

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Centro Tecnológico

Pós MCI - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Sediado no: LABMETRO - Laboratório de Metrologia e Automação
 Departamento de Engenharia Mecânica

***“MEDIÇÃO DE FORMAS LIVRES TRIDIMENSIONAIS POR
TOPOGRAMETRIA”***

Dissertação Submetida à: Universidade Federal de Santa Catarina para a
 Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia

ANALUCIA VIEIRA FANTIN

Florianópolis, Fevereiro de 1999

**“MEDIDAÇÃO DE FORMAS LIVRES TRIDIMENSIONAIS POR
TOPOGRAMETRIA”**

ANALUCIA VIEIRA FANTIN

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA

ESPECIALIDADE METROLOGIA CIENTÍFICA E INDUSTRIAL E APROVADA EM SUA
FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METROLOGIA
CIENTÍFICA E INDUSTRIAL



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.

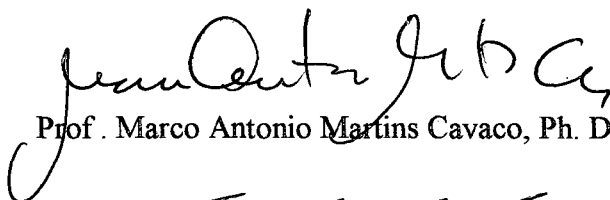
ORIENTADOR



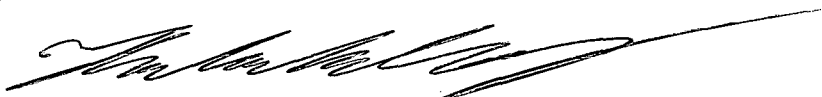
Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.

COORDENADOR DO CURSO DE MESTRADO EM METROLOGIA CIENTÍFICA E INDUSTRIAL

Banca Examinadora:



Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.



Prof. Frank Hrebabetzky, Dr. Rer. Nat.



Prof. Jorge Muniz Barreto, Ds. Ca.

*Dedico esta dissertação a quatro pessoas que souberam
compreender minha ausência para realização deste
trabalho e apoiar minha escolha:*

Meus pais, Jane e Celso

Minha irmã, Luciana

Minha avó, Sara

AGRADECIMENTOS

- À Universidade Federal de Santa Catarina;
- À Fundação CERTI e ao Labmetro pela infra-estrutura oferecida;
- À CAPES pelo apoio financeiro;
- Ao Prof. Armando Albertazzi pela orientação;
- À Danilo José dos Santos pelo auxílio na parte experimental;
- À Rosana Magali Vieira pela constante disponibilidade;
- A minha família e amigos pela paciência e apoio nas incontáveis horas de ausência;
- À Carlos Aurélio Pezzotta pelo amor e incentivo;
- Ao amigo Celso Veiga pelas constantes lições;
- Aos colegas Gustavo Donatelli e Ricardo Sutério pelo estímulo e aprendizado;
- A todos os colegas do LABMETRO pela amizade e companheirismo;

RESUMO

Este trabalho implementa um sistema de medição de superfícies livres tridimensionais baseado na técnica da “Topogrametria” e avalia o seu desempenho metrológico. Resultante da combinação das técnicas de Topometria – onde formas espaciais são medidas pela projeção oblíqua de franjas – e Fotogrametria – onde imagens de duas câmaras são combinadas para, por triangulação, determinar as coordenadas 3D dos pontos observados – a Topogrametria reúne alguns dos aspectos positivos e as limitações de cada uma destas duas técnicas.

Os princípios de medição e o modelamento matemático do sistema são detalhadamente apresentados no trabalho. Uma sistemática de calibração do sistema é também apresentada e modelada. Aspectos relativos à implementação computacional do sistema são discutidos.

As principais fontes de incerteza do sistema topogramétrico são levantadas e seus efeitos sobre o desempenho do sistema são analisados. Experimentos controlados e simulações numéricas foram utilizados para quantitativamente estimar os efeitos sistemáticos e aleatórios de cada fonte de incertezas sobre os parâmetros de calibração e sobre as coordenadas medidas pelo sistema. Medições efetuadas em peças com geometria conhecida foram utilizadas para verificar a validade do modelamento utilizado para estimar os erros aleatórios do sistema.

Alguns exemplos de aplicação do sistema desenvolvido em superfícies tridimensionais selecionadas são também apresentados no trabalho.

ABSTRACT

A system for measurement of free form geometries is implemented and its metrological reliability is evaluated. Combining the methods of *Topometry*, where tridimensional forms are obtained by oblique fringe projection, and *Photogrametry*, where two images obtained from different cameras are used to determine the coordinates of points in the measured surface, *Topogrametry* combines the advantages and some limitations of both techniques.

The measuring principle and mathematical modelling of this technique are described in detail, as well as a procedure for calibration of the developed system. Aspects related to the computational implementation are discussed.

The main sources of uncertainty and their effects on the metrological performance of the system are analysed. Experiments and simulation have been used to determine systematic and random effects of each source of uncertainty on calibration parameters and coordinates of measured points. Measurement of calibrated surfaces were used to verify the validity of the developed and implemented model for random error estimation.

The system developed was applied to the measurement of several free form surfaces and these experiments and results are also described in this work.

SUMÁRIO

Capítulo 1. Introdução	12
Capítulo 2. Métodos Óticos de Medição de Forma	14
2.1 Técnicas de moiré	14
2.2 Métodos de medição por triangulação	15
2.2.1 Triangulação a laser	15
2.2.2 Triangulação por folha de luz	18
2.2.3 Projeção de franjas	18
2.2.4 Luz codificada	19
2.2.5 Projeção de franjas com deslocamento de fase (Phase shifting)	20
2.2.6 Fotogrametria	23
2.3 Análise comparativa das diferentes técnicas de medição 3D por triangulação	24
2.4 Estado da Arte	24
2.4.1 Cylan 3D	25
2.4.2 ATOS	26
Capítulo 3. Topogrametria	28
3.1 Conceito	28
3.2 Avaliação da técnica Topogramétrica	29
3.3 Modelo matemático	30
3.3.1 Transformação de coordenadas	30
3.3.2 Coordenadas 3D	36
Capítulo 4. Calibração da Orientação e Posição das Câmaras	38
4.1 Padrão de calibração	39
4.2 Identificação dos pontos de calibração na imagem	40
4.2.1 Aquisição da imagem	40
4.2.2 Binarização da imagem	41
4.2.3 Cálculo do centro do topo dos pinos	41
4.3 Modelo matemático	42
4.3.1 Parâmetros de calibração	42
4.3.2 Modelo não linear	43

4.3.3	Resolução do sistema não linear	44
4.4	Software para calibração	47
4.5	Testes de validação	48
4.5.1	Repetitividade da calibração	48
4.5.2	Experimentos com padrão deslocado	49
Capítulo 5.	Algoritmo para Medição de Formas 3D por Topogrametria	50
5.1	Processamento das imagens das franjas	50
5.1.1	Projeção de franjas	50
5.1.2	Mapas de fase	51
5.1.3	Remoção do salto de fase	53
5.2	Algoritmo de identificação dos pontos homólogos	53
5.2.1	Algoritmo de procura	54
5.2.2	Interpolação bilinear	55
5.3	Cálculo das coordenadas 3D	57
5.4	Geração do modelo geométrico	57
5.5	Teste de validação do algoritmo de determinação dos pontos homólogos	58
Capítulo 6.	Desempenho Metrológico do Sistema de Medição Topogramétrico	59
6.1	Fontes de incerteza	59
6.1.1	Diagrama de incertezas	60
6.2	Avaliação das fontes de incertezas primárias do sistema de medição Topogramétrico	61
6.2.1	Incerteza das coordenadas do padrão de calibração	61
6.2.2	Incerteza padrão das coordenadas dos centróides	62
6.2.3	Incerteza padrão da determinação dos pontos homólogos	63
6.3	Propagação das incertezas	64
6.3.1	Análise dos efeitos individuais das fontes de incerteza	64
6.3.2	Estimativa da incerteza padrão combinada	68
6.4	Incerteza do sistema de medição frente a ângulos críticos	69
6.5	Validação metrológica do sistema de medição Topogramétrico	71
6.5.1	Medições de superfícies geométricas regulares	71
6.5.2	Avaliação das incertezas aleatórias	74
6.6	Resultados	75
6.7	Aplicações do sistema	76

Capítulo 7. Conclusões.....	78
Capítulo 8. Referências Bibliográficas	80
ANEXOS.....	82
A Tabelas de resultados de medições	83
A.1 Tabela de repetitividade do sistema Topogramétrico	83
A.2 Incerteza expandida x Ângulo de medição	84
B Sensores óticos	85
B.1 Europa	85
B.2 América do Norte.....	86
C Especificação dos componentes utilizados pelo sistema Topogramétrico	89
C.1 Padrão de calibração.....	89
C.2 Câmaras CCD	90
C.3 Projetor.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 : Moiré de projeção	14
Figura 2.2 : Arranjo ótico da técnica de triangulação a Laser	16
Figura 2.3 : Triangulação a laser	16
Figura 2.4 : Princípio da triangulação por folha de luz	18
Figura 2.5 : Ambigüidade de franjas projetadas	19
Figura 2.6 : Técnica de Luz codificada	19
Figura 2.7 : Projeção de franjas	20
Figura 2.8 : Imagens com franjas deslocadas em 90°	20
Figura 2.9 : Mapa de fase de uma superfície esférica obtido por projeção de franjas	22
Figura 2.10 : Determinação de um ponto por Fotogrametria	23
Figura 2.11 : Cylan 3D	25
Figura 2.12 : Funcionamento do sistema Cylan 3D	25
Figura 2.13: Sensor ATOS	26
Figura 3.1 : Arranjo ótico Topogramétrico	28
Figura 3.2 : Princípio da triangulação	29
Figura 3.3: Sistema de coordenadas global (X,Y,Z) e da câmara (x,y)	31
Figura 3.4 : Sentido de rotação dos eixos	33
Figura 3.5 : Sistema de coordenadas global , de visualização e da câmara	34
Figura 3.6 : Projeção central de um ponto	35
Figura 4.1 : Arranjo ótico para a calibração da orientação e posição das câmaras	38
Figura 4.2 : Fluxograma do processo de calibração das câmaras	39
Figura 4.3 : Padrão de calibração : (a) imagem sem tratamento, (b) imagem binarizada	41
Figura 4.4 : Imagem binarizada de um pino observado frontalmente	41
Figura 4.5 : Software de calibração	47
Figura 5.1 : Padrões de franjas	50
Figura 5.2 : Perfil da projeção de franjas verticais sobre uma superfície esférica	51
Figura 5.3 : Mapas de fase	52
Figura 5.4 : Malha de pontos selecionados para medição	54
Figura 5.5 : Interpolação bilinear	56
Figura 6.1 : Diagrama do processo de medição por Topogrametria	59

Figura 6.2 : Diagrama “Espinha de peixe” das fontes de incerteza do sistema de medição Topogramétrico.....	61
Figura 6.3 : Propagação de incertezas: (a) Simulação 1, (b) Simulação 2, (c) Simulação 3.	65
Figura 6.4 : Influência das fontes de incerteza: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.....	67
Figura 6.5 : Propagação simultânea de todas as fontes de incertezas	68
Figura 6.6 : Incerteza expandida das coordenadas para diferentes ângulos de medição	69
Figura 6.7 : Incerteza expandida x Ângulo entre câmaras.....	70
Figura 6.8 : Plano matemático x Plano medido.....	71
Figura 6.9 : Superfície de uma esfera medida no sistema Topogramétrico	72
Figura 6.10 : Perfil da esfera medida no sistema Topogramétrico	73
Figura 6.11 : Simulação para avaliação da parcela aleatória da incerteza	74
Figura 6.12 : Resultado de medição do plano obtido com a MMC (vermelho) e com o sistema Topogramétrico (azul).....	76
Figura 6.13 Resultado de medição da esfera obtido com a MMC (vermelho) e com o sistema Topogramétrico (azul).....	76
Figura 6.14 : Perfil de uma boneca medida no sistema Topogramétrico.....	77
Figura 6.15 : Xícara medida no sistema Topogramétrico.....	77
Figura 6.16 : Forma livre feita em argila medida no sistema Topogramétrico.....	77

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

Criar um modelo geométrico tridimensional (3D) a partir de um modelo físico já existente é um dos problemas encontrados no desenvolvimento de produtos. A técnica de digitalização empregada, assim como o software utilizado para reproduzir a superfície real do modelo a partir dos dados digitalizados, têm grande influência sobre a velocidade e fidelidade do processo de medição.

Quando pretende-se medir formas livres, as técnicas óticas de digitalização possuem vantagens comparadas às técnicas mecânicas convencionais. A não necessidade de contato e a rapidez na medição de uma grande quantidade de pontos são vantagens que podem ser determinantes na escolha do método de medição.

Este trabalho busca implementar e analisar metrologicamente uma nova técnica ótica de medição de formas 3D – a Topogrametria – cujo princípio combina Topometria e Fotogrametria. Métodos topométricos são utilizados para caracterizar pontos da superfície do objeto medido através de projeção de franjas. Técnicas fotogramétricas são utilizadas para combinar imagens de duas câmaras e calcular as coordenadas espaciais do objeto por triangulação. Ao final desta dissertação o leitor terá conhecimento dos princípios, vantagens e limitações do Sistema Topogramétrico.

Como o trabalho está estruturado

O trabalho inicia com um rápido estudo dos métodos óticos de medição mais utilizados atualmente e, para ilustrar a proposta deste trabalho, são apresentados dois sistemas de medição que encontram-se disponíveis comercialmente.

O terceiro capítulo é uma introdução à Topogrametria onde estão descritas a configuração do modelo físico e a dedução do modelo matemático.

Detalhes do funcionamento do sistema de medição Topogramétrico são apresentados nos capítulos 4 e 5 onde são discutidas etapas como: calibração do sistema, cálculo de fase e triangulação.

A análise metroológica do sistema Topogramétrico pode ser encontrada no sexto capítulo, bem como resultados de ensaios utilizando o padrão de calibração e peças geométricas conhecidas que serviram de parâmetros para validação e determinação da incerteza do sistema. Algumas aplicações na medição de formas livres são também exibidas.

Finalmente, no último capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho.

CAPÍTULO 2. MÉTODOS ÓTICOS DE MEDIÇÃO DE FORMA

A grande maioria dos métodos óticos de medição de formas é baseada em triangulação, isto é, o cálculo da distância absoluta através da definição de um triângulo.

Esse capítulo apresenta uma síntese das técnicas óticas mais utilizadas na medição de formas, incluindo também métodos não absolutos como as técnicas de moiré. Ao final do capítulo são apresentados dois modernos sistemas comerciais baseados em técnicas óticas de medição.

2.1 Técnicas de moiré

As técnicas de moiré são baseadas na superposição de linhas de grades. Essas grades podem ser físicas, produzidas em transparência ou filme fotográfico, ou podem ser geradas por interferência de duas ondas de luz projetadas sobre a superfície. O batimento entre as linhas de duas grades parecidas dá origem as chamadas “franjas de moiré”.

As técnicas de moiré são amplamente utilizadas para medição de formas. O método mais simples é o chamado “shadow moiré” ou moiré de projeção.

Moiré de projeção

Esta técnica, como o próprio nome diz, é caracterizada pela superposição das linhas de uma grade com a sua própria sombra [1][2][3], gerando as franjas de moiré. Moiré de projeção é muito utilizada para medir formas e deformações fora do plano.

No processo de medição as linhas de grade devem ser iluminadas e observadas sob ângulos conhecidos (Figura 2.1).

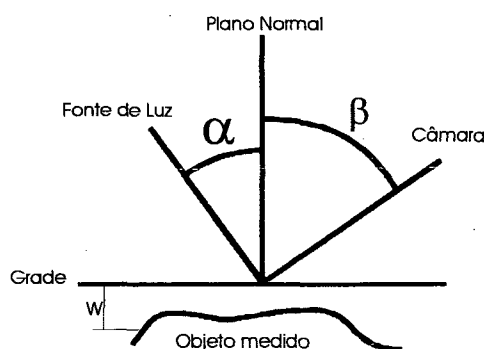


Figura 2.1 : Moiré de projeção

A diferença de altura entre a grade e um ponto sobre a superfície do objeto é calculada em milímetros por :

$$W(x, y) = \frac{n.p}{\tan(\alpha) + \tan(\beta)} \quad (2.1)$$

Onde:

p: período da grade [mm]

n: ordem da franja de moiré associada ao ponto medido [adimensional]

α : ângulo de iluminação [°]

β : ângulo de observação [°]

A técnica de moiré de projeção, por ser relativamente simples e barata, é uma ferramenta útil na mecânica experimental e para medição e controle de formas.

Atualmente essa técnica têm sido empregada na medicina para detecção de escolioses e análise da curvatura da espinha. Estes problemas são avaliados através da assimetria das franjas de moiré observadas nas costas do indivíduo [4].

2.2 Métodos de medição por triangulação

A triangulação é dita ativa se os vértices do triângulo são definidos pelo ponto a ser medido, uma fonte de luz e um sensor. A triangulação é chamada passiva se os vértices do triângulo são formados por dois sensores e o ponto a ser medido.

2.2.1 Triangulação a laser

A técnica de triangulação a laser é descrita em [5]. A representação esquemática de um arranjo ótico desta técnica é mostrada na Figura 2.2.

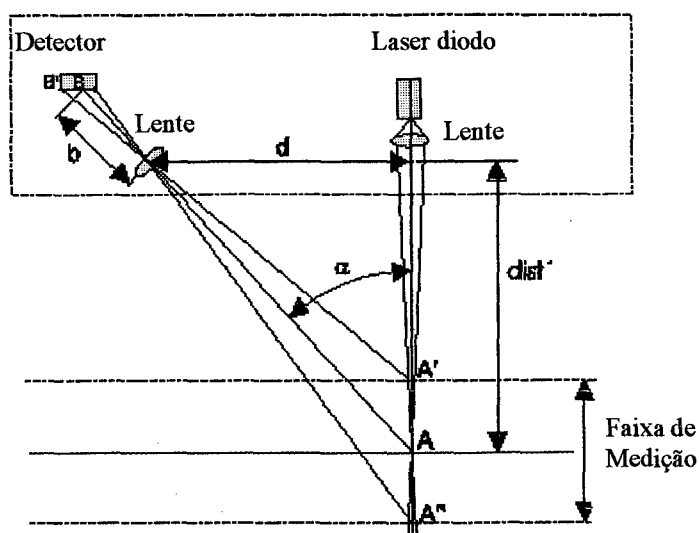


Figura 2.2 : Arranjo ótico da técnica de triangulação a Laser

O feixe de laser diodo é focado no ponto A sobre a superfície do objeto. O ângulo de incidência é normal. O ponto sobre a superfície é observado a partir de um ângulo α e, com o auxílio de uma lente, forma-se sobre a superfície de um detector a imagem do ponto, representada na figura pelo ponto B.

Tipicamente o ângulo de observação α está em um intervalo de 30° a 45° . A mudança da distância do objeto ($dist'$) resulta em um deslocamento do ponto projetado sobre o fotodetector, como mostrado na Figura 2.3.

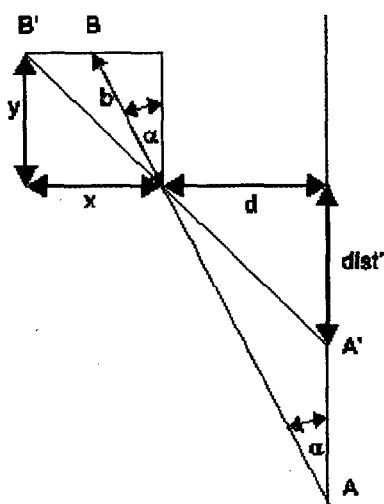


Figura 2.3 : Triangulação a laser

Esta configuração é a combinação de dois triângulos adjacentes, o que permite o cálculo da distância absoluta ($dist'$). Sendo assim, pode-se dizer que :

$$x = BB' + b \cdot \sin \alpha \quad (2.2)$$

$$y = b \cdot \cos \alpha \quad (2.3)$$

Por semelhança de triângulos :

$$\frac{d}{dist'} = \frac{x}{y} \quad (2.4)$$

Pela simples substituição de “x” e “y” chega-se a uma relação geométrica não linear que determina a distância $dist'$ entre o ponto A' e as lentes utilizadas para projetar imagem :

$$dist' = \frac{d \cdot b \cdot \cos \alpha}{b \cdot \sin \alpha + BB'} \quad (2.5)$$

Onde :

d : descreve a distância entre as lentes utilizadas para projetar a imagem e as lentes utilizadas para focar a imagem.

b : distância da imagem ao detector.

α : ângulo de visão.

BB' : deslocamento do ponto no detector.

Através de um arranjo mecânico que move o sensor em uma ou mais direções este sensor pode ser utilizado para percorrer linhas ou mesmo toda a superfície do objeto, ponto a ponto.

2.2.2 Triangulação por folha de luz

Essa técnica é uma extensão da triangulação a laser. Ao invés de um ponto apenas ser projetado sobre o objeto, uma folha de luz é projetada [6].

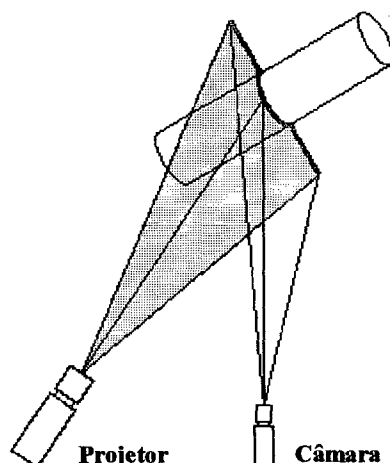


Figura 2.4 : Princípio da triangulação por folha de luz

As coordenadas 3D dos pontos ao longo da linha, resultante da interseção da folha projetada com a superfície medida, podem ser calculadas com apenas uma imagem adquirida pela câmara.

Para se chegar às coordenadas 3D de todo objeto, a folha de luz deve percorrer toda a superfície. Durante esta varredura múltiplas imagens devem ser adquiridas. Embora esta técnica seja mais rápida que a triangulação a laser ponto a ponto, ela pode consumir muito tempo dependendo do sensor utilizado.

2.2.3 Projeção de franjas

Através desta técnica uma grande parte do objeto pode ser medida com a aquisição de apenas uma imagem [6][7].

Existem algumas limitações na técnica de medição por projeção de franjas. Uma delas torna-se facilmente perceptível no caso do objeto possuir furos ou quebras internas (Figura 2.5). Nesse caso as franjas aparecem cortadas, podendo ser facilmente confundidas com franjas vizinhas, gerando uma ambigüidade das franjas. Esse tipo de problema dificulta o cálculo das coordenadas 3D.

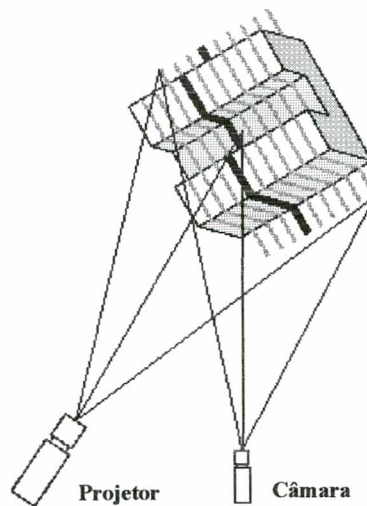


Figura 2.5 : Ambigüidade de franjas projetadas

2.2.4 Luz codificada

O uso desta técnica pode evitar o problema de ambigüidade de franjas. A técnica tem como princípio a projeção e a aquisição das imagens de múltiplos padrões de franjas sobre todo o objeto [6], como mostrado na Figura 2.6.

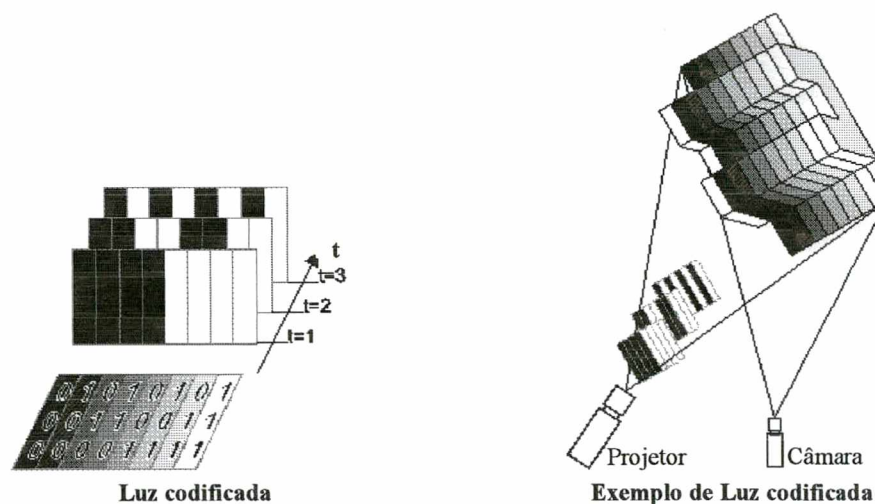


Figura 2.6 : Técnica de Luz codificada

Considerando um pixel no CCD, esses diferentes padrões resultam em uma série de valores binários : 0 para o preto, 1 para o branco. Com estes valores tabelados é possível a criação de um código binário para cada pixel. A partir de n diferentes imagens se obtém 2^n códigos diferentes. Para se chegar ao valor referente da coordenada espacial correspondente a um determinado pixel deve-se aplicar um algoritmo de decodificação [8].

2.2.5 Projeção de franjas com deslocamento de fase (Phase shifting)

Esta técnica permite a determinação da forma 3D partindo-se da projeção de um padrão regular de franjas retas igualmente espaçadas e o processamento da imagem resultante. A forma 3D é determinada através de uma técnica denominada “deslocamento de fase” que atribui um ângulo de fase para cada pixel da imagem [9][10].

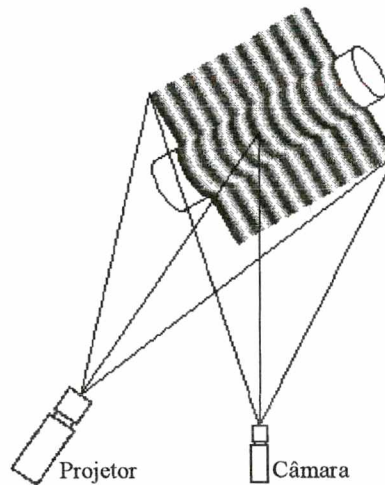


Figura 2.7 : Projeção de franjas

A elevada incerteza no cálculo do ângulo de fase pode ser alcançada através de uma projeção de franjas, cujo perfil da intensidade de luz seja quase senoidal. Para a aplicação dessa técnica três ou quatro imagens, com padrões de franjas deslocados, devem ser adquiridas. A Figura 2.8 mostra um exemplo para o caso de serem aplicados 4 deslocamentos.

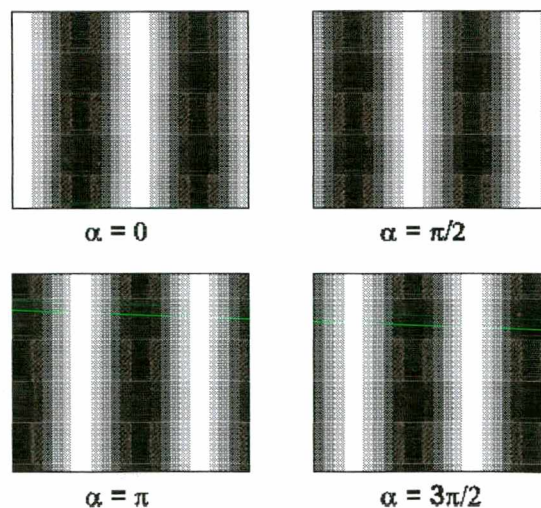


Figura 2.8 : Imagens com franjas deslocadas em 90°

O ângulo de fase pode ser calculado para cada pixel através das intensidades das imagens adquiridas, uma para cada deslocamento [11]. Assumindo que o perfil de intensidade das franjas projetadas é senoidal, a intensidade de cada pixel pode ser escrita como:

$$I(x,y)=U(x,y).[1+C(x,y).\cos(\varphi(x,y)+\alpha)] \quad (2.6)$$

Onde :

$I(x,y)$: Intensidade de um ponto de coordenadas x e y

$U(x,y)$: Fator associado à intensidade média de cada pixel

$C(x,y)$: Fator associado ao contraste das franjas projetadas

$\varphi(x,y)$: Ângulo de fase

α : Deslocamento angular das franjas projetadas

Para o caso de 4 deslocamentos, o passo é de 90° , isto é, as franjas são deslocadas o equivalente a 90° em termos de fase entre cada imagem.

O valor do ângulo de fase correspondente a cada franja pode ser estimado a partir das transformações mostradas a seguir :

$$I_1 = U(x,y).[1+C(x,y).\cos(\varphi)] \quad (2.7)$$

$$I_2 = U(x,y).[1+C(x,y).\cos(\varphi+90^\circ)] = U(x,y).[1-C(x,y).\sin\varphi] \quad (2.8)$$

$$I_3 = U(x,y).[1+C(x,y).\cos(\varphi+180^\circ)] = U(x,y).[1-C(x,y).\cos\varphi] \quad (2.9)$$

$$I_4 = U(x,y).[1+C(x,y).\cos(\varphi+270^\circ)] = U(x,y).[1+C(x,y).\sin\varphi] \quad (2.10)$$

A combinação destas equações resulta em:

$$\tan\varphi = \frac{I_2 - I_4}{I_3 - I_1} \quad (2.11)$$

Ou seja ,

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_2 - I_4}{I_3 - I_1}\right) \quad (2.12)$$

Se apenas 3 deslocamentos forem utilizados, o passo muda para 120° e o ângulo de fase pode ser calculado por :

$$\varphi = \arctan\left(\sqrt{3} \frac{I_3 - I_2}{2I_1 - I_2 - I_3}\right) \quad (2.13)$$

Uma das vantagens da técnica de 4 passos é a simplicidade do modelo matemático, apesar da necessidade de uma imagem a mais quando comparada com a técnica de 3 passos.

Após o cálculo do ângulo de fase, que encontra-se dentro do intervalo $[-\pi, \pi]$, este valor é relacionado aos tons de cinza da imagem, que estão no intervalo $[0..255]$. Assim é possível gerar um mapa de fase do objeto (Figura 2.9).



Figura 2.9 : Mapa de fase de uma superfície esférica obtido por projeção de franjas

Vantagens da técnica :

- Fácil determinação do ângulo de fase através de operações matemáticas simples.
- Uso de apenas uma câmara CCD.
- Baixo custo.

Desvantagens da técnica :

- Ambigüidade dos valores de fase.
- Necessidade de múltiplas imagens e de dispositivo para deslocar as franjas

Para resolver o problema de ambigüidade de fase é aplicado um algoritmo para remoção do salto de fase [12]. A técnica é conhecida como “Phase Unwrapping” e, através de relação entre pixels vizinhos, determina o ângulo de fase absoluto de cada pixel a partir dos valores disponibilizados pela equação (2.12) ou (2.13) dentro do intervalo $[-\pi, \pi]$.

2.2.6 Fotogrametria

A fotogrametria é uma técnica passiva de triangulação, não depende de fontes ativas, como projetores ou laser [13].

A Figura 2.10 mostra o princípio da fotogrametria: Um ponto tridimensional (m) é projetado no plano da imagem (m') por interseção desse plano com a linha formada pelo centro ótico (c) e o ponto m .

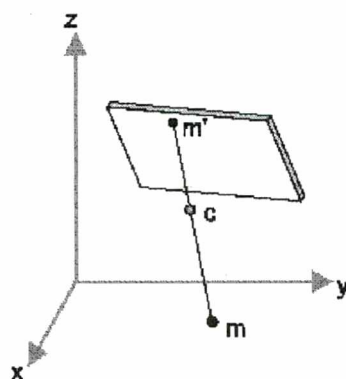


Figura 2.10 : Determinação de um ponto por Fotogrametria

Se a posição e orientação dos eixos da câmara são conhecidos, a linha de projeção pode ser reconstruída a partir de um ponto na imagem e a posição 3D do centro ótico.

Para o cálculo da coordenada 3D de um ponto qualquer do objeto, a linha de projeção de uma imagem adicional é necessária, pois este ponto é encontrado pela interseção das linhas de projeção originárias dessas duas imagens. Um problema com esta técnica é encontrar os pontos homólogos das duas imagens, ou seja, os pontos nas duas imagens referentes ao mesmo ponto físico na peça medida.

2.3 Análise comparativa das diferentes técnicas de medição 3D por triangulação

Técnica	Incerteza	Limitações	Velocidade	Medição com objeto em movimento	Custo	Limitações do objeto a ser medido
Triangulação a laser com movimento em duas direções	Alta	Mecânica	Muito baixa	Não é possível	Médio Custo	Poucas
Folha de Luz com movimento em uma direção	Média	Mecânica e resolução da câmara	Baixa	Limitada	Médio e alto custo	Poucas
Projeção de franjas	Baixa	Iluminação e resolução da câmara	Muito rápida	É possível	Baixo Custo	Muitas
Luz codificada	Média	Iluminação e resolução da câmara	Média	Não é possível	Baixo Custo	Moderado
Projeção de franjas com deslocamento de fase	Alta	Combinação dos tons de cinza e resolução da câmara	Rápida	Não é possível	Baixo Custo	Moderado
Fotogrametria	Alta	Resolução da câmara	Muito rápida	É possível	Baixo Custo	Poucas

Tabela 2.1 : Comparação entre diferentes métodos de medição utilizando triangulação [6]

Faixa de Medição e Incerteza :

A faixa lateral de medição, ou seja, intervalo na direção x e y em técnicas de triangulação ativas pode ser ajustado para medir poucos mm² até vários m², sendo a principal limitação dada pela intensidade de luz ativa na medição. A faixa na direção z é cerca de 50% da dimensão lateral.

A resolução lateral depende do campo da imagem e da resolução do sensor ótico. Essa resolução é 512 x 512 em câmaras CCD padrão, e até 4098 x 4098 em câmaras CCD especiais.

A resolução na direção z depende do campo da imagem e do ângulo de triangulação, isto é o ângulo entre o projetor e os eixos da câmara. Quanto maior o ângulo melhor a resolução.

2.4 Estado da Arte

Nesta seção serão introduzidos dois modernos sistemas de medição cujos princípios de funcionamento baseiam-se em métodos de triangulação. À fim de complementar a pesquisa, foram reunidos em uma lista no Anexo C os principais sensores óticos disponíveis comercialmente na Europa e América do Norte.

2.4.1 Cylan 3D

A técnica de medição utilizada pelo Cylan 3D da INTECU [14] é a triangulação a laser. O objeto é posicionado sobre uma mesa de rotação e a medição é feita ponto a ponto (Figura 2.11).

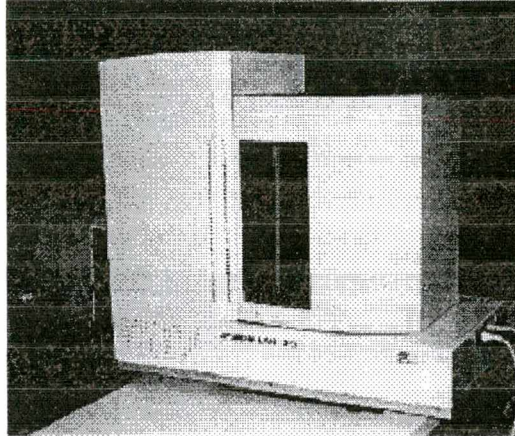


Figura 2.11 : Cylan 3D

O sistema de medição completo é formado pelo scanner Cylan 3D para aquisição de dados e, um PC que é conectado ao scanner para armazenamento dos dados.

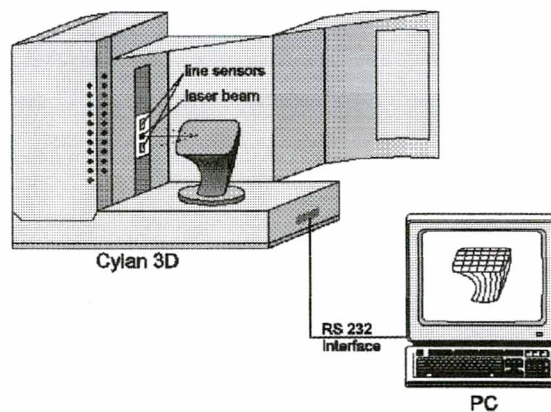


Figura 2.12 : Funcionamento do sistema Cylan 3D

Os resultados gerados pelo sistema podem ser diretamente processados em sistemas CAD, pois a nuvem de pontos 3D resultante da medição é arquivada em qualquer um dos formatos ASCII, DXF, VD, VDAFS, NC, SCAN ou RAW.

Dados Técnicos do Sensor :

Técnica de medição	Triangulação a laser com seleção inteligente.
Volume de medição	diâmetro máximo 300 mm altura máxima 375 mm
Superfície do objeto a ser medido	não lustroso e não escuro
Direção de varredura dos pontos	circular ou espiral
Intervalos da malha de pontos	múltiplos de 0,1 mm na vertical e múltiplos de 0,043945° (360° / 8192) na horizontal.
Distância de trabalho	máximo 180 mm horizontal.
Incerteza	25-125 μm , dependente da distância do objeto ao sensor.
Velocidade do Sensor	4000 pontos por segundo
Interface (scanner-PC)	RS 232 (115,200 bit/s)

Tabela 2.2 : Dados técnicos do sensor Cylan 3D

2.4.2 ATOS

O sistema ATOS (Advanced Topometric Sensor) é baseado na combinação de três técnicas óticas de medição: luz codificada [6], phase shifting [9][10], e fotogrametria [13]. O sensor ATOS é formado por um projetor de franjas e duas câmaras posicionadas simetricamente a este projetor [15][16].

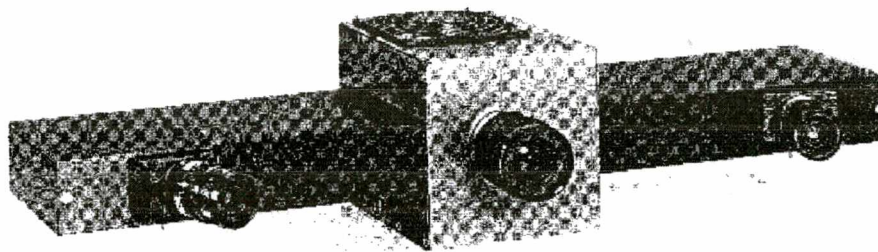


Figura 2.13: Sensor ATOS

Esse arranjo com dois sensores abre um leque de possibilidades para aplicação de novas técnicas de medição. Dois sensores podem ser utilizados na fotogrametria para estimar a posição espacial de pontos de referência marcados sobre o objeto. O sistema coordenado do objeto pode ser relacionado ao sistema coordenado fixo do sensor através da posição espacial de múltiplos pontos de referência.

Um dos métodos de combinação dos dados medidos de múltiplos sensores é através de pontos de referência. Estes pontos são colocados sobre o objeto em teste ou sobre uma superfície na qual o objeto esteja rigorosamente referenciado. A cada nova posição do objeto, pelo menos três pontos de referência devem ser identificados pelas imagens adquiridas por duas câmaras CCD, é importante que os mesmos pontos sejam identificados em cada uma das imagens. O centro desses pontos de referência são calculados por meio de processamento de imagem e, as coordenadas 3D desses pontos são estimadas através de métodos fotogramétricos.

Através da posição espacial desses pontos de referência, a transformação de uma posição do objeto para uma segunda posição pode ser conhecida, sendo assim, os dados obtidos de diferentes posições do objeto podem ser combinados automaticamente em um único sistema de coordenadas.

Um outro método pode ser aplicado para a combinação dos dados medidos de múltiplos sensores sem a necessidade de interferência do usuário. Com a ajuda de um sistema de posicionamento com alta repetitividade (não há necessidade de alta precisão no posicionamento absoluto), os pontos espaciais do objeto podem ser medidos automaticamente.

Dados Técnicos do Sensor :

Volume de medição	380 x 230 x 280mm
Incerteza	$\pm 10 \mu\text{m}$
Distância entre pontos medidos	500 μm
Tempo de medição	10 segundos
Número de pontos medidos	439.296
Dimensões do sensor	520 x 110 x 150 mm
Massa do Sensor	2,5 kg
Distância de trabalho	500 mm

Tabela 2.3 : Dados técnicos do sensor ATOS

CAPÍTULO 3. TOPOGRAMETRIA

3.1 Conceito

A Topogrametria [17] é um método que combina técnicas de medição absolutas. O nome Topogrametria surge da fusão entre as técnicas Topométrica [9] e Fotogramétrica [13].

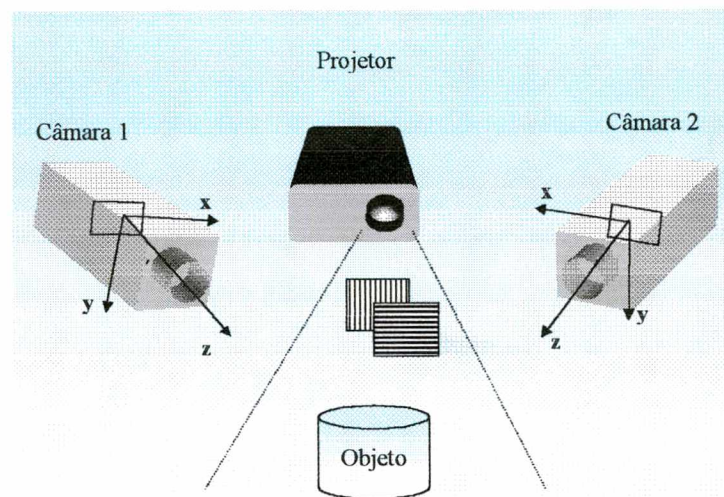


Figura 3.1 : Arranjo óptico Topográfico

O princípio fundamental da Fotogrametria diz que: “Duas perspectivas do mesmo objeto guardam entre si uma certa relação geométrica” [13]. Na Fotogrametria esta relação geométrica é identificada através de imagens fotográficas. No caso da Topogrametria a relação geométrica é identificada através de mapas de fase do objeto resultantes de medição Topométrica.

Para a medição Topométrica dois padrões ortogonais de franjas são sequencialmente projetados sobre a superfície a medir através de um projetor de luz estruturada. A técnica de deslocamento de fase (phase shifting) é adotada para o cálculo de quatro mapas de fase destes padrões, dois para cada câmara CCD, sendo um para as franjas verticais e outro para as horizontais. Os diferentes mapas de fase contém as informações necessárias para relacionar os pontos das imagens das duas câmaras correspondentes ao mesmo ponto físico no objeto a ser medido. Estes pontos possuem a mesma fase em imagens de câmaras diferentes e, são denominados “pontos homólogos”.

A aplicação da técnica fotogramétrica parte do conhecimento dos pontos homólogos objetivando o cálculo das coordenadas tridimensionais (3D) do objeto através do princípio de triangulação [18].

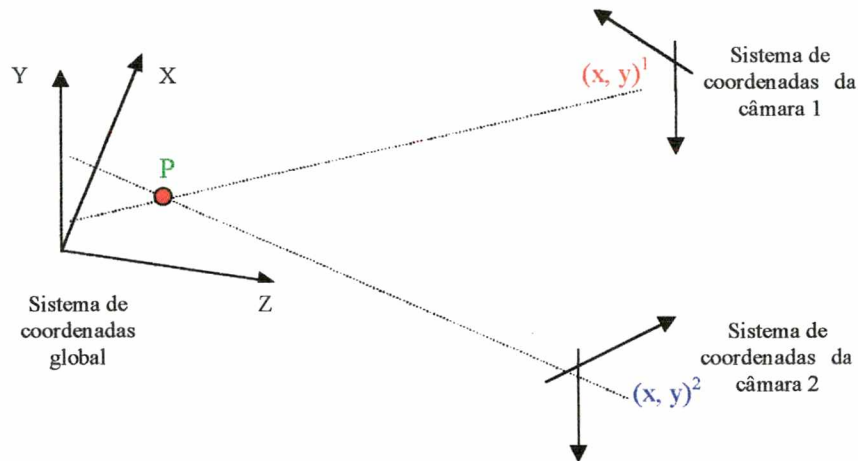


Figura 3.2 : Princípio da triangulação

Os vértices do triângulo são definidos pelo ponto a ser medido, e suas correspondentes projeções nas imagens das duas câmaras (pontos homólogos). O algoritmo de procura destes pontos é discutido em 5.2.1.

A visão é uma simples analogia ao sistema de medição representado na figura 3.2, onde os olhos representam as câmaras do sistema. Assim como na visão, se uma das câmaras deixar de “enxergar” perde-se a noção de profundidade.

Em síntese, para o cálculo das coordenadas espaciais de um objeto basta que se conheça as retas que definem as linhas de projeção nas imagens das duas câmaras. O modelo matemático que descreve estas linhas, assim como o cálculo das coordenadas 3D, são apresentados neste capítulo.

3.2 Avaliação da técnica Topogramétrica

A técnica topogramétrica reúne, além dos princípios, vantagens e desvantagens presentes nas técnicas de projeção de franjas (seção 2.2.3), projeção de franjas com deslocamento de fase (seção 2.2.5) e Fotogrametria (seção 2.2.6).

O número de câmaras utilizadas na medição topogramétrica aumenta o grau de liberdade no cálculo das coordenadas 3D e consequentemente melhora a incerteza do cálculo. Além disso a rápida aquisição e processamento das imagens permite medir uma grande quantidade de pontos em poucos minutos.

Ao contrário das técnicas de “Triangulação a laser” (seção 2.2.1) e “Folha de luz” (seção 2.2.2), a Topogrametria requer um investimento inicial relativamente baixo, pois não é necessário o uso de laser. A simples iluminação branca é utilizada.

Em comparação à técnica de “Luz codificada” (seção 2.2.4), onde múltiplos padrões de franjas são utilizados, a Topogrametria utiliza apenas dois padrões de franjas para a determinação dos pontos homólogos. A quantificação eficiente dos mapas de franjas através da técnica de deslocamento de fase permite que apenas dois padrões de franjas sejam suficientes para a determinação precisa dos pontos homólogos de duas câmaras diferentes.

Infelizmente a Topogrametria carrega as limitações encontradas nas técnicas de Projeção de franjas e Fotogrametria. Peças espelhadas, transparentes ou de cor muito escura, assim como peças que possuem furos ou descontinuidades tornam-se críticas quando medidas em sistemas deste tipo. O sistema Topogramétrico torna-se ideal para medição de formas livres onde a principal preocupação é o tempo e o custo da medição.

3.3 Modelo matemático

O modelo matemático adotado neste trabalho [19] requer a caracterização de retas que descrevem a projeção dos pontos espaciais no plano da imagem, estas retas são definidas por pontos que a princípio estão localizados em diferentes sistemas de coordenadas. Inicialmente, três sistemas são definidos (Figura 3.2): sistema de coordenadas da câmara 1 (SCC1), sistema de coordenadas da câmara 2 (SCC2) e o sistema de coordenadas global (SCG), onde o objeto é representado.

3.3.1 Transformação de coordenadas

Nesta seção será introduzida a transformação entre coordenadas globais e coordenadas de uma das câmaras. Posteriormente o conceito será estendido à segunda câmara. A representação gráfica dos sistemas de coordenadas pode ser vista na Figura 3.3.

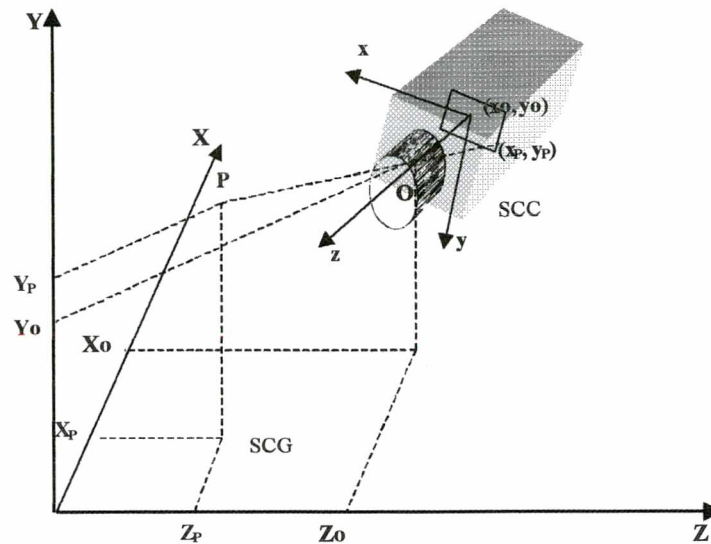


Figura 3.3: Sistema de coordenadas global (X,Y,Z) e da câmara (x,y)

Onde :

SCC: Sistema de coordenadas da câmara (coordenadas em milímetros).

SCG: Sistema de coordenadas global (coordenadas em milímetros).

(X_P, Y_P, Z_P) : Coordenadas de um ponto P do objeto no SCG.

(X_o, Y_o, Z_o) : Coordenadas do centro da lente no SCG.

(x_P, y_P) : Projeção de P na imagem no SCC.

(x_o, y_o) : Ponto principal, interseção do eixo ótico com o plano da imagem no SCC.

Para que as operações matemáticas sejam realizadas em unidade reais (milímetros), é necessária uma conversão de unidades, pois o sistema de coordenadas original da imagem digitalizada pela câmara possui suas coordenadas expressas em pixel (i,j), com a origem localizada no canto superior esquerdo da imagem e os eixos coordenados no mesmo sentido do SCC (Figura 3.3). A conversão aproximada de coordenadas em pixel para coordenadas em milímetros (SCC) depende das especificações da câmara, o CCD das câmaras utilizadas neste trabalho [20] possuem uma área útil de aproximadamente 8,80 x 6,60 mm de dimensões, o equivalente a 640 x 480 pixels na imagem. O fator de conversão dessas unidades pode ser estimado a partir destes valores:

$$S_x = \frac{640}{8,80} \Rightarrow S_x = 72,72 \text{ pixels/mm}$$

(3.1)

$$S_y = \frac{480}{6,60} \Rightarrow S_y = 72,72 \text{ pixeis/mm} \quad (3.2)$$

Feita a conversão de unidades, é possível descrever o modelo matemático que rege as transformações dos sistemas de coordenadas. Operações básicas compõem estas transformações:

- Translação da origem do sistema de coordenadas global ao centro ótico da lente.
- Rotações dos eixos do sistema de coordenadas global.
- Projeção dos pontos sobre o plano da imagem.

3.3.1.1 Translação

O primeiro passo para transformação do sistema de coordenadas é a translação do sistema global para o centro da lente (Ponto O), que matricialmente pode ser descrita por:

$$\begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_o \\ 0 & 1 & 0 & -Y_o \\ 0 & 0 & 1 & -Z_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

O vetor resultante representa as coordenadas do ponto P no novo sistema de coordenadas transladado.

3.3.1.2 Rotação

Após transladado o sistema global é alinhado ao sistema de coordenadas da câmara por operações de rotação. O sentido de rotação dos eixos é mostrado na Figura 3.4.

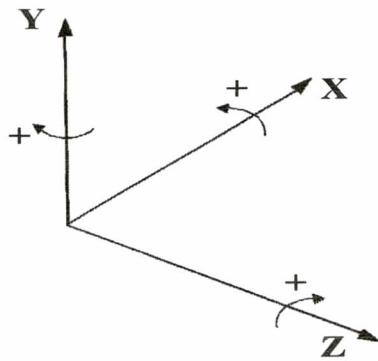


Figura 3.4 : Sentido de rotação dos eixos

As rotações podem ser representadas matricialmente.

Rotação em torno do eixo X sobre um ângulo “ θ_x ” :

$$R_{\theta_x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\text{sen}(\theta_x) \\ 0 & \text{sen}(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Rotação em torno do eixo Y sobre um ângulo “ θ_y ”:

$$R_{\theta_y} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \text{sen}(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Rotação em torno do eixo Z sobre um ângulo “ θ_z ”:

$$R_{\theta_z} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\text{sen}(\theta_z) & 0 \\ \text{sen}(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

A matriz R representa o resultado das três rotações.

$$R = R_{\theta_z} \cdot R_{\theta_y} \cdot R_{\theta_x} \quad (3.7)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z)\cos(\theta_y) & \cos(\theta_z)\sin(\theta_y)\sin(\theta_x) - \sin(\theta_z)\cos(\theta_x) & \cos(\theta_z)\sin(\theta_y)\cos(\theta_x) + \sin(\theta_z)\sin(\theta_x) \\ \cos(\theta_y)\sin(\theta_z) & \cos(\theta_x)\cos(\theta_z) + \sin(\theta_y)\sin(\theta_x)\sin(\theta_z) & -\cos(\theta_z)\sin(\theta_x) + \sin(\theta_z)\sin(\theta_y)\cos(\theta_x) \\ -\sin(\theta_y) & \sin(\theta_x)\cos(\theta_y) & \cos(\theta_y)\cos(\theta_x) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

As coordenadas definidas no novo sistema passam a ser :

$$\begin{bmatrix} X_{VP} \\ Y_{VP} \\ Z_{VP} \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} X_p - X_o \\ Y_p - Y_o \\ Z_p - Z_o \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

As coordenadas (X_{VP}, Y_{VP}, Z_{VP}) representam as coordenadas do ponto P no novo sistema de coordenadas, chamado “sistema de visualização”. A Figura 3.5 mostra graficamente o resultado das operações.

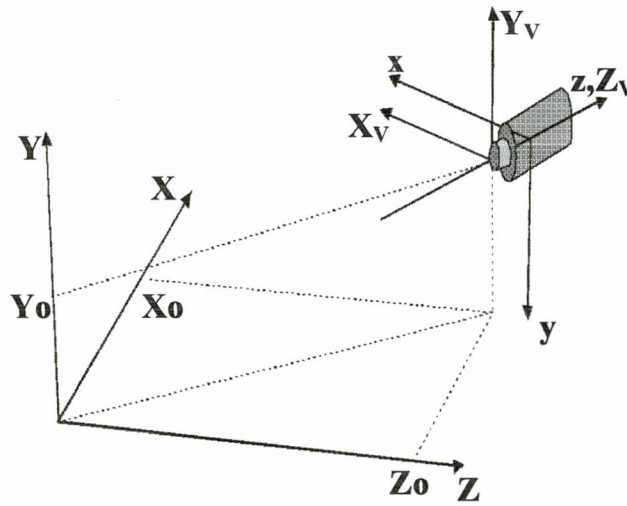


Figura 3.5 : Sistema de coordenadas global , de visualização e da câmara

3.3.1.3 Projeção

A transformação perspectiva projeta os pontos 3D do sistema de visualização sobre o plano da imagem. A figura 3.6 mostra a projeção do ponto P.

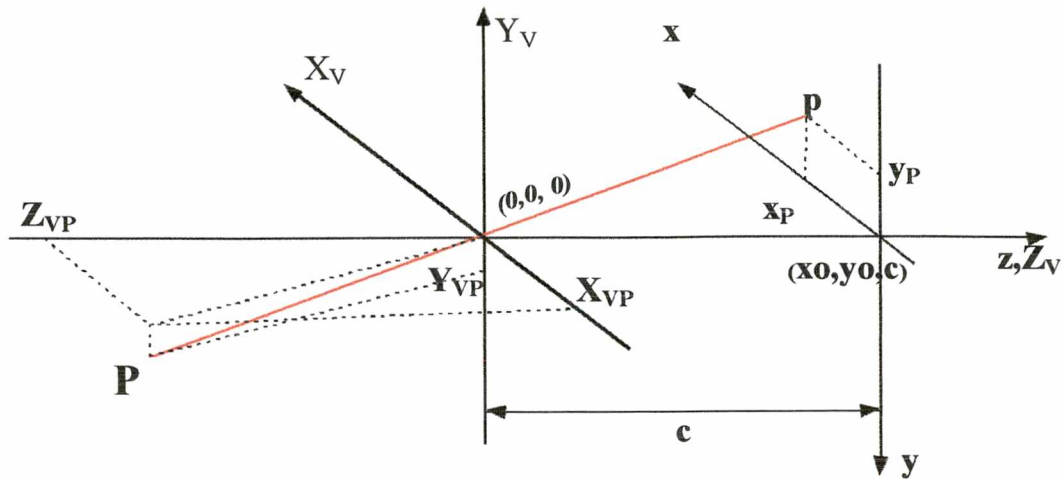


Figura 3.6 : Projeção central de um ponto

O ponto principal (x_0, y_0) , interseção do eixo ótico com o plano da imagem, é definido como a origem do SCC e “c” a distância entre o plano da imagem e centro ótico.

Através de semelhança de triângulos facilmente chega-se às razões:

$$\frac{x_P - x_0}{c} = -\frac{X_{VP}}{Z_{VP}} \quad (3.10)$$

$$\frac{y_P - y_0}{c} = \frac{Y_{VP}}{Z_{VP}} \quad (3.11)$$

As coordenadas do ponto P no SCC seguem diretamente das relações descritas acima :

$$x_P = -\frac{cX_{VP}}{Z_{VP}} + x_0 \quad (3.12)$$

$$y_P = \frac{cY_{VP}}{Z_{VP}} + y_0 \quad (3.13)$$

É importante ressaltar que Z_{VP} é um valor negativo devido a convenção estabelecida ao sentido dos eixos, e portanto os sinais atribuídos as coordenadas (x_P, y_P) obedecem o sentido dos eixos coordenados da imagem. O modelo descrito neste trabalho não é único, ou seja, depende das convenções estabelecidas (sentido dos eixos, matriz de rotação, sentido de rotação, etc).

3.3.2 Coordenadas 3D

Definida as transformações (3.12) e (3.13) que relacionam as coordenadas dos sistemas global e de uma das câmaras, o cálculo das coordenadas espaciais do objeto torna-se fácil.

Substituindo as variáveis definidas por (3.9) nas equações (3.12) e (3.13) e estendendo estas equações de transformação para a segunda câmara chega-se a um sistema de quatro equações lineares dependentes das coordenadas globais do objeto (X_P, Y_P, Z_P).

O sistema de equações é expresso por :

$$A \cdot \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = b \quad (3.14)$$

Onde :

$$A = \begin{bmatrix} (x_{P1} - x_{O1}) \cdot R1_{31} + c_1 \cdot R1_{11} & (x_{P1} - x_{O1}) \cdot R1_{32} + c_1 \cdot R1_{12} & (x_{P1} - x_{O1}) \cdot R1_{33} + c_1 \cdot R1_{13} \\ (y_{P1} - y_{O1}) \cdot R1_{31} + c_1 \cdot R1_{21} & (y_{P1} - y_{O1}) \cdot R1_{32} + c_1 \cdot R1_{22} & (y_{P1} - y_{O1}) \cdot R1_{33} + c_1 \cdot R1_{23} \\ (x_{P2} - x_{O2}) \cdot R2_{31} + c_2 \cdot R2_{11} & (x_{P2} - x_{O2}) \cdot R2_{32} + c_2 \cdot R2_{12} & (x_{P2} - x_{O2}) \cdot R2_{33} + c_2 \cdot R2_{13} \\ (y_{P2} - y_{O2}) \cdot R2_{31} + c_2 \cdot R2_{21} & (y_{P2} - y_{O2}) \cdot R2_{32} + c_2 \cdot R2_{22} & (y_{P2} - y_{O2}) \cdot R2_{33} + c_2 \cdot R2_{23} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$b = \begin{bmatrix} X_{O1} \cdot [(x_{P1} - x_{O1}) \cdot R1_{31} + c_1 \cdot R1_{11}] + Y_{O1} \cdot [(x_{P1} - x_{O1}) \cdot R1_{32} + c_1 \cdot R1_{12}] + Z_{O1} \cdot [(x_{P1} - x_{O1}) \cdot R1_{33} + c_1 \cdot R1_{13}] \\ X_{O1} \cdot [(y_{P1} - y_{O1}) \cdot R1_{31} + c_1 \cdot R1_{21}] + Y_{O1} \cdot [(y_{P1} - y_{O1}) \cdot R1_{32} + c_1 \cdot R1_{22}] + Z_{O1} \cdot [(y_{P1} - y_{O1}) \cdot R1_{33} + c_1 \cdot R1_{23}] \\ X_{O2} \cdot [(x_{P2} - x_{O2}) \cdot R2_{31} + c_2 \cdot R2_{11}] + Y_{O2} \cdot [(x_{P2} - x_{O2}) \cdot R2_{32} + c_2 \cdot R2_{12}] + Z_{O2} \cdot [(x_{P2} - x_{O2}) \cdot R2_{33} + c_2 \cdot R2_{13}] \\ X_{O2} \cdot [(y_{P2} - y_{O2}) \cdot R2_{31} + c_2 \cdot R2_{21}] + Y_{O2} \cdot [(y_{P2} - y_{O2}) \cdot R2_{32} + c_2 \cdot R2_{22}] + Z_{O2} \cdot [(y_{P2} - y_{O2}) \cdot R2_{33} + c_2 \cdot R2_{23}] \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Parâmetros do sistema :

$R1_{ij}$ e $R2_{ij}$: Elementos das matrizes de rotação referentes a transformação de coordenadas da primeira e segunda câmara respectivamente.

c_1 : Distância do centro ótico ao plano da imagem da primeira câmara.

c_2 : Distância do centro ótico ao plano da imagem da segunda câmara.

(X_{O1}, Y_{O1}, Z_{O1}) : Coordenadas do centro ótico da primeira câmara no SCG (O_1).

(X_{O2}, Y_{O2}, Z_{O2}) : Coordenadas do centro ótico da segunda câmara no SCG (O_2).

(x_{P1}, y_{P1}) : Projeção do ponto P no plano da imagem da primeira câmara.

(x_{P2}, y_{P2}) : Projeção do ponto P no plano da imagem da segunda câmara.

(x_{O1}, y_{O1}) : Ponto principal no plano da imagem da primeira câmara.

(x_{O2}, y_{O2}) : Ponto principal no plano da imagem da segunda câmara.

As coordenadas espaciais são encontradas por mínimos quadrados, visto que há uma equação redundante no sistema :

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot b \quad (3.17)$$

Como visto até o momento, o cálculo das coordenadas de um objeto no SCG só é possível com o conhecimento de alguns parâmetros (matriz de rotação dos eixos, coordenadas do centro ótico da câmara,...), para isso é feita uma calibração. A calibração tende a definir precisamente cada um destes parâmetros, evitando erros sistemáticos na forma do objeto a ser medido.

CAPÍTULO 4. CALIBRAÇÃO DA ORIENTAÇÃO E POSIÇÃO DAS CÂMARAS

O cálculo das coordenadas espaciais de um objeto por triangulação depende de parâmetros que caracterizam a orientação e posição das câmaras em relação ao sistema de coordenadas onde o objeto está representado (SCG). O processo para determinação destes parâmetros, intitulado “Calibração das câmaras”, é detalhado neste capítulo.

A calibração é feita tendo como referência um objeto padrão tridimensional conhecido (padrão de calibração), que permite que as câmaras sejam calibradas individualmente.

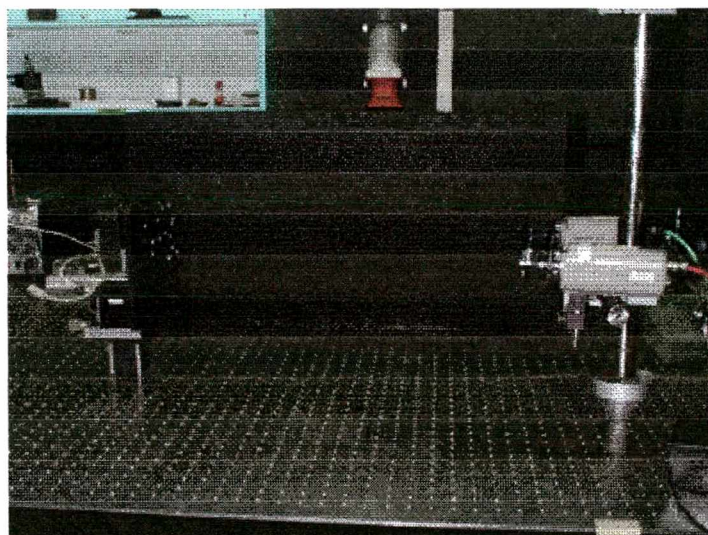


Figura 4.1 : Arranjo ótico para a calibração da orientação e posição das câmaras

As coordenadas de um número suficiente de pontos do padrão de calibração no sistema de coordenadas da câmara (SCC) obtidas a partir da imagem, juntamente com as suas respectivas coordenadas espaciais, são simultaneamente aplicadas às equações (3.12) e (3.13), o que dá origem a um sistema de equações não lineares. Estes pontos são conhecidos na literatura como “pontos de calibração” ou “pontos de referência”.

Métodos numéricos são aplicados para a linearização deste sistema de equações e o sistema resultante é resolvido por Mínimos Quadrados [21].

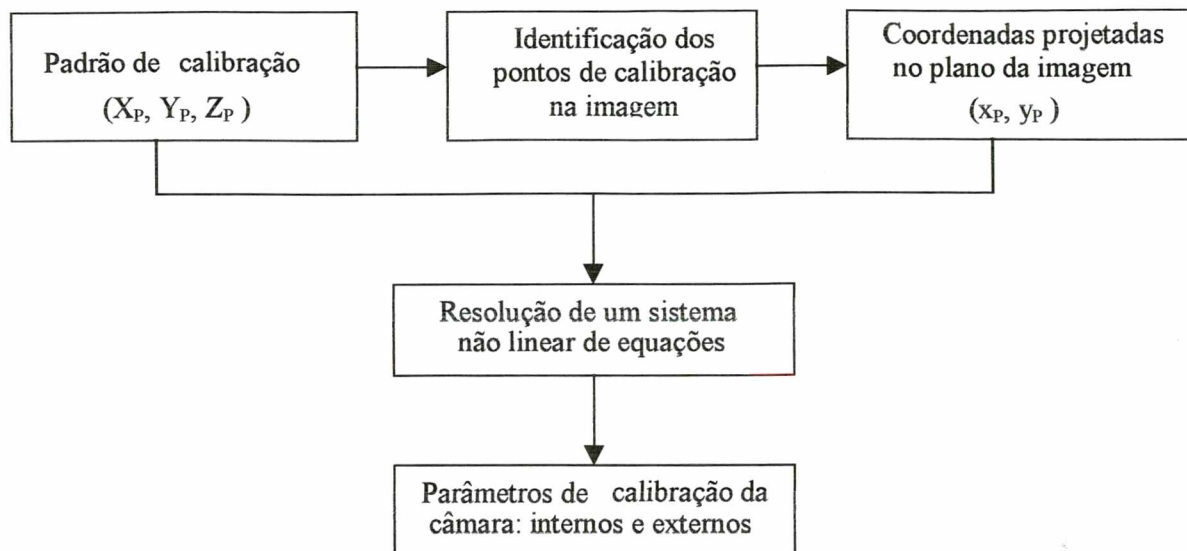


Figura 4.2 : Fluxograma do processo de calibração das câmaras

É importante que os parâmetros de calibração sejam precisamente determinados, pois a incerteza do sistema de medição é fortemente dependente do processo de calibração. Se isto não for observado, erros sistemáticos expressivos podem comprometer diretamente a forma medida do objeto.

4.1 Padrão de calibração

O Sistema Topogramétrico desenvolvido neste trabalho dispõe de um padrão de calibração que consiste de uma placa com 15 pinos regularmente dispostos, como pode ser visto no Anexo C.1. O topo dos pinos é branco e estão configurados com alturas diferentes em relação à base. Os pontos de calibração são definidos pelo centro do círculo localizado no topo destes pinos.

Para se obter um bom resultado alguns cuidados devem ser tomados quanto ao padrão de calibração utilizado:

- Elevado contraste da imagem dos pontos, devendo utilizar-se preferencialmente círculos brancos sobre um fundo preto.
- Distribuição regular dos pinos cobrindo todo o campo de medição.
- Coordenadas dos pontos de calibração conhecidas com pequena incerteza.

A elevada precisão na determinação do centro do topo dos pinos e as respectivas alturas em relação a base é fundamental para que a calibração das câmaras possa ser efetuada com baixa incerteza.

O padrão de calibração utilizado no sistema Topogramétrico foi medido em uma máquina de medir por coordenadas (MMC) Zeiss modelo UPM 550.

4.2 Identificação dos pontos de calibração na imagem

Para a calibração das câmaras é fundamental que, assim como a posição espacial dos pontos de calibração, as coordenadas na imagem dos pontos de calibração também sejam bem determinadas. Técnicas de processamento de imagem são utilizadas para a identificação dessas coordenadas.

Durante este procedimento recomenda-se a utilização de iluminação branca uniforme para melhor visibilidade do padrão.

Os passos para identificação dos pontos na imagem resumem-se em :

- Aquisição da imagem do padrão.
- Binarização da imagem.
- Cálculo do centro do topo dos pinos (centróides).

4.2.1 Aquisição da imagem

Para a aquisição e processamento das imagens o sistema de medição dispõe de duas câmaras CCD idênticas (Anexo A.1), um sistema de aquisição e processamento de imagens (MATROX PULSAR/MIL versão 5.2) e um computador Pentium 166.

As duas câmaras são posicionadas de forma a visualizar todos os pontos do padrão de calibração. Devido a diferença de altura dos pinos não é possível um perfeito ajuste focal sobre todos os pontos, sendo a focalização das imagens feita sobre um dos pinos de altura média.

A posição do padrão de calibração não pode ser alterada até que ambas as câmaras sejam calibradas, pois o SCG é definido através do padrão de calibração.

4.2.2 Binarização da imagem

A iluminação do ambiente, quando não homogênea, pode gerar sombras e reflexos sobre o objeto, que variam de acordo com o ângulo de observação. A binarização da imagem é uma forma de minimizar este tipo de problema.

A binarização consiste em transformar uma imagem com diferentes tons de cinza que variam do nível 0 ao 255, em uma imagem totalmente preta (nível 0) e branca (nível 255).

Sombras e ruídos são eliminados na binarização da imagem e apenas a área branca referente ao topo dos pinos é observada.

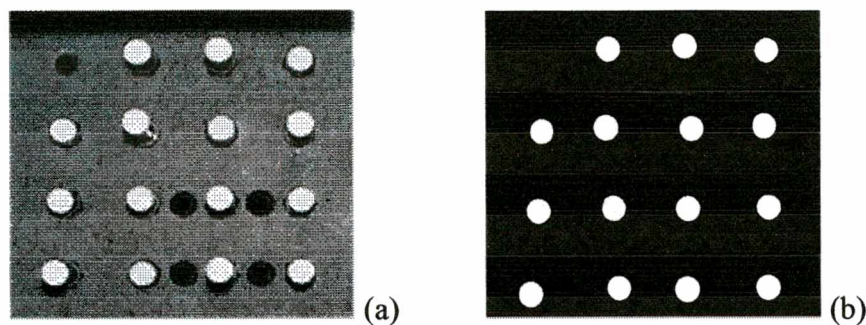


Figura 4.3 : Padrão de calibração : (a) imagem sem tratamento, (b) imagem binarizada

4.2.3 Cálculo do centro do topo dos pinos

A determinação do centro do círculo branco na imagem é efetuada através do seu centróide. O cálculo das coordenadas do centróide é feito em pixels (i, j) e logo após convertido para milímetros (x, y) .

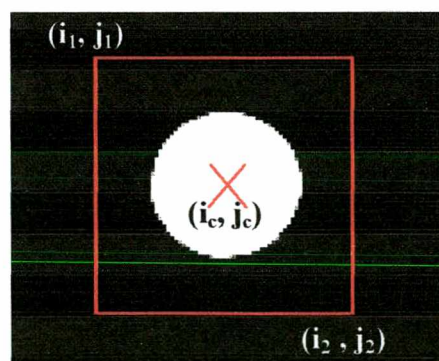


Figura 4.4 : Imagem binarizada de um pino observado frontalmente

$$i_c = \frac{\sum_{j=j_1}^{j_2} \sum_{i=i_1}^{i_2} I(i, j) \cdot i}{\sum_{j=j_1}^{j_2} \sum_{i=i_1}^{i_2} I(i, j)} \quad (4.1)$$

$$j_c = \frac{\sum_{j=j_1}^{j_2} \sum_{i=i_1}^{i_2} I(i, j) \cdot j}{\sum_{j=j_1}^{j_2} \sum_{i=i_1}^{i_2} I(i, j)} \quad (4.2)$$

Onde :

$I(i, j)$: Nível de cinza do pixel de posição (i, j)

(i_1, j_1) e (i_2, j_2) : Limites do retângulo definido para o cálculo do centróide

(i_c, j_c) : Coordenadas do centróide (em pixel)

A conversão de unidades (pixel/mm) é feita a partir do fator de conversão dado por (3.1) e (3.2). É válido lembrar que mesmo que este fator de conversão não seja exato, isto não dará origem a erros de medição porque o mesmo fator utilizado na calibração será utilizado no momento da medição.

4.3 Modelo matemático

4.3.1 Parâmetros de calibração

Segundo o modelo descrito neste trabalho, os parâmetros a serem determinados podem ser classificados em : parâmetros internos e parâmetros de orientação externa da câmara [19].

Parâmetros internos da câmara

Os parâmetros internos são independentes do posicionamento das câmaras, e estão ligados à geometria interna da câmara. São determinados na calibração:

- Coordenadas do ponto principal (x_o, y_o) .

O ponto principal é onde o eixo ótico intercepta o plano da imagem. É ele quem estabelece a origem do SCC. Assumindo que o eixo ótico intercepta o plano da imagem no seu centro estima-se que o ponto principal seja próximo do centro do CCD onde se forma a imagem.

- Distância principal (c).

Distância entre o plano da imagem e centro ótico. Corresponde à distância focal da lente quando estas estão focadas no infinito. Caso contrário esta distância é maior que o comprimento focal.

Embora o ponto principal seja muito próximo do centro da imagem e a distância principal seja muito próxima do comprimento focal é necessário que estes parâmetros sejam calibrados para minimizar os erros sistemáticos de medição.

Parâmetros de orientação externa da câmara

Os parâmetros de orientação externa são totalmente dependentes do posicionamento da câmara em relação ao SCG. São determinados na calibração:

- Coordenadas do centro ótico da lente no SCG (X_o, Y_o, Z_o).

Estas coordenadas definem a localização do centro ótico no SCG.

- Ângulos ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$).

Diferença angular entre os eixos do SCG e os respectivos eixos do sistema de coordenadas da câmara que está sendo calibrada.

4.3.2 Modelo não linear

O modelo matemático para determinação dos parâmetros de calibração é conseqüente das equações (3.12) e (3.13). Estas equações que descrevem as linhas de projeção das coordenadas x e y levam a um conjunto de funções erro cujas variáveis independentes descrevem um modelo não linear [22]. Os parâmetros são determinados através da minimização destas funções.

Funções erro não lineares do sistema :

$$F_1(L) = (x - x_o).Z_v + c.X_v \quad (4.3)$$

$$F_2(L) = (y - y_o).Z_v - c.Y_v \quad (4.4)$$

Onde :

$$\begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix}$$

$$L = [X_o, Y_o, Z_o, \sin(\theta_x), \cos(\theta_x), \sin(\theta_y), \cos(\theta_y), \sin(\theta_z), \cos(\theta_z), c, x_o, y_o]$$

As funções são descritas em relação aos senos e cossenos dos ângulos θ_x , θ_y e θ_z . A determinação dos senos e cossenos dos ângulos, ao invés dos valores dos ângulos, elimina o risco de ambigüidade na solução, visto que o sinal do ângulo e o quadrante em que este se encontra tornam-se irrelevantes. Esta configuração exige o acréscimo de três funções ao sistema.

$$F_3(L) = K_e \cdot (\sin^2(\theta_x) + \cos^2(\theta_x) - 1) \quad (4.5)$$

$$F_4(L) = K_e \cdot (\sin^2(\theta_y) + \cos^2(\theta_y) - 1) \quad (4.6)$$

$$F_5(L) = K_e \cdot (\sin^2(\theta_z) + \cos^2(\theta_z) - 1) \quad (4.7)$$

Ao contrário das funções (4.3) e (4.4), o contradomínio das funções (4.5), (4.6) e (4.7) restringe-se ao intervalo $[-1, 1]$. Esta diferença de magnitude entre as funções gera erros de truncamento numérico durante a resolução do sistema. Para evitar erros deste tipo estas funções são multiplicadas por um fator de peso equivalente às demais funções ($K_e = Z_o \cdot c$).

4.3.3 Resolução do sistema não linear

Um número mínimo de pontos é utilizado para formar um sistema de equações a partir das equações (4.3)-(4.7).

O método de Newton Raphson é aplicado para linearização do sistema [23]. O método de Newton Raphson é uma extensão multi-dimensional do método de Newton que aproxima uma curva pela tangente para determinar o zero da função.

$$\frac{\partial F_1^{(n)}}{\partial L_{(1)}^{(m)}} \cdot \Delta L_{(1)}^{(m)} + \frac{\partial F_1^{(n)}}{\partial L_{(2)}^{(m)}} \cdot \Delta L_{(2)}^{(m)} + \frac{\partial F_1^{(n)}}{\partial L_{(3)}^{(m)}} \cdot \Delta L_{(3)}^{(m)} + \dots + \frac{\partial F_1^{(n)}}{\partial L_{(12)}^{(m)}} \cdot \Delta L_{(12)}^{(m)} = -F_1^{(n)} \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial F_2^{(n)}}{\partial L_{(1)}^{(m)}} \cdot \Delta L_{(1)}^{(m)} + \frac{\partial F_2^{(n)}}{\partial L_{(2)}^{(m)}} \cdot \Delta L_{(2)}^{(m)} + \frac{\partial F_2^{(n)}}{\partial L_{(3)}^{(m)}} \cdot \Delta L_{(3)}^{(m)} + \dots + \frac{\partial F_2^{(n)}}{\partial L_{(12)}^{(m)}} \cdot \Delta L_{(12)}^{(m)} = -F_2^{(n)} \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial L_{(4)}^{(m)}} \Delta L_{(4)}^{(m)} + \frac{\partial F_3}{\partial L_{(5)}^{(m)}} \Delta L_{(5)}^{(m)} = -F_3 \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial L_{(6)}^{(m)}} \Delta L_{(6)}^{(m)} + \frac{\partial F_4}{\partial L_{(7)}^{(m)}} \Delta L_{(7)}^{(m)} = -F_4 \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial F_5}{\partial L_{(8)}^{(m)}} \Delta L_{(8)}^{(m)} + \frac{\partial F_5}{\partial L_{(9)}^{(m)}} \Delta L_{(9)}^{(m)} = -F_5 \quad (4.12)$$

Onde :

$$\Delta L^{(m)} = L^{(m-1)} - L^{(m)}$$

m : Número da iteração

$L^{(m)}$: Vetor dos parâmetros de calibração na m'ésima iteração

As equações (4.8) e (4.9) são aplicadas sobre todos os pontos de calibração.

O sistema pode ser representado matricialmente :

$$A \Delta L^{(m)} = -F \quad (4.13)$$

Onde :

A : Matriz jacobiana calculada nos pontos de calibração

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1^{(1)}}{\partial L_{(1)}^{(m)}} & \dots & \frac{\partial F_1^{(1)}}{\partial L_{(4)}^{(m)}} & \frac{\partial F_1^{(1)}}{\partial L_{(5)}^{(m)}} & \frac{\partial F_1^{(1)}}{\partial L_{(6)}^{(m)}} & \frac{\partial F_1^{(1)}}{\partial L_{(7)}^{(m)}} & \frac{\partial F_1^{(1)}}{\partial L_{(8)}^{(m)}} & \frac{\partial F_1^{(1)}}{\partial L_{(9)}^{(m)}} & \dots & \frac{\partial F_1^{(1)}}{\partial L_{(12)}^{(m)}} \\ \frac{\partial F_2^{(1)}}{\partial L_{(1)}^{(m)}} & \dots & \frac{\partial F_2^{(1)}}{\partial L_{(4)}^{(m)}} & \frac{\partial F_2^{(1)}}{\partial L_{(5)}^{(m)}} & \frac{\partial F_2^{(1)}}{\partial L_{(6)}^{(m)}} & \frac{\partial F_2^{(1)}}{\partial L_{(7)}^{(m)}} & \frac{\partial F_2^{(1)}}{\partial L_{(8)}^{(m)}} & \frac{\partial F_2^{(1)}}{\partial L_{(9)}^{(m)}} & \dots & \frac{\partial F_2^{(1)}}{\partial L_{(12)}^{(m)}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_1^{(n)}}{\partial L_{(1)}^{(m)}} & \dots & \frac{\partial F_1^{(n)}}{\partial L_{(4)}^{(m)}} & \frac{\partial F_1^{(n)}}{\partial L_{(5)}^{(m)}} & \frac{\partial F_1^{(n)}}{\partial L_{(6)}^{(m)}} & \frac{\partial F_1^{(n)}}{\partial L_{(7)}^{(m)}} & \frac{\partial F_1^{(n)}}{\partial L_{(8)}^{(m)}} & \frac{\partial F_1^{(n)}}{\partial L_{(9)}^{(m)}} & \dots & \frac{\partial F_1^{(n)}}{\partial L_{(12)}^{(m)}} \\ \frac{\partial F_2^{(n)}}{\partial L_{(1)}^{(m)}} & \dots & \frac{\partial F_2^{(n)}}{\partial L_{(4)}^{(m)}} & \frac{\partial F_2^{(n)}}{\partial L_{(5)}^{(m)}} & \frac{\partial F_2^{(n)}}{\partial L_{(6)}^{(m)}} & \frac{\partial F_2^{(n)}}{\partial L_{(7)}^{(m)}} & \frac{\partial F_2^{(n)}}{\partial L_{(8)}^{(m)}} & \frac{\partial F_2^{(n)}}{\partial L_{(9)}^{(m)}} & \dots & \frac{\partial F_2^{(n)}}{\partial L_{(12)}^{(m)}} \\ 0 & 0 & \frac{\partial F_3}{\partial L_{(4)}^{(m)}} & \frac{\partial F_3}{\partial L_{(5)}^{(m)}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial F_4}{\partial L_{(6)}^{(m)}} & \frac{\partial F_4}{\partial L_{(7)}^{(m)}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial F_5}{\partial L_{(8)}^{(m)}} & \frac{\partial F_5}{\partial L_{(9)}^{(m)}} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$(4.14)$$

$$\Delta L^{(m)} = [\Delta L_{(1)}^{(m)} \Delta L_{(2)}^{(m)} \dots \Delta L_{(12)}^{(m)}] \quad (4.15)$$

$$F = [F_1^{(1)} F_2^{(1)} F_1^{(2)} F_2^{(2)} \dots F_1^{(n)} F_2^{(n)} F_3 F_4 F_5] \quad (4.16)$$

O sistema linearizado é resolvido pelo método de Mínimos Quadrados, visto que o número de equações é redundante.

$$A^T \cdot A \cdot \Delta L^{(m)} = -A^T \cdot F \quad (4.17)$$

O vetor solução é então determinado :

$$\Delta L^{(m)} = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot F \quad (4.18)$$

Um vetor inicial $L^{(0)}$ deve ser estimado na primeira iteração do sistema. Os parâmetros de orientação externa da câmara são estimados a partir da configuração da bancada experimental. A distância principal é estimada pelo valor do comprimento focal e o ponto principal é estimado pelo centro da imagem do CCD de dimensões 640 x 480 pixels :

$$x_0 = \frac{640 - 1}{2} \approx 4,4 \text{ mm} \quad (4.19)$$

$$y_0 = \frac{480 - 1}{2} \approx 3,3 \text{ mm} \quad (4.20)$$

Onde :

S_x, S_y : Fator de conversão pixel/mm

A convergência do sistema é obtida quando um dos critérios é satisfeito:

$$\sum F_{(L^{(m)})}^2 \leq \epsilon_1 \quad (4.21)$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{12} (\Delta L_{(i)}^{(m)})^2} \leq \epsilon_2 \quad (4.22)$$

Onde ε_1 e ε_2 são valores especificados pelo usuário do algoritmo de calibração.

Os somatórios em (4.21) e (4.22) são realizados sobre todos os pontos de calibração. No mínimo 6 pontos são necessários para gerar um sistema de equações que determine os 12 parâmetros de uma câmara. A incerteza na determinação destes parâmetros diminui quando este número de pontos aumenta. Geralmente o número de pontos utilizados deve ser suficiente para cobrir todo o espaço de medição, neste trabalho foram utilizados 15 pontos para a calibração das câmaras.

4.4 Software para calibração

O software implementado para calibração foi desenvolvido em Visual Basic versão 5.1 [24].

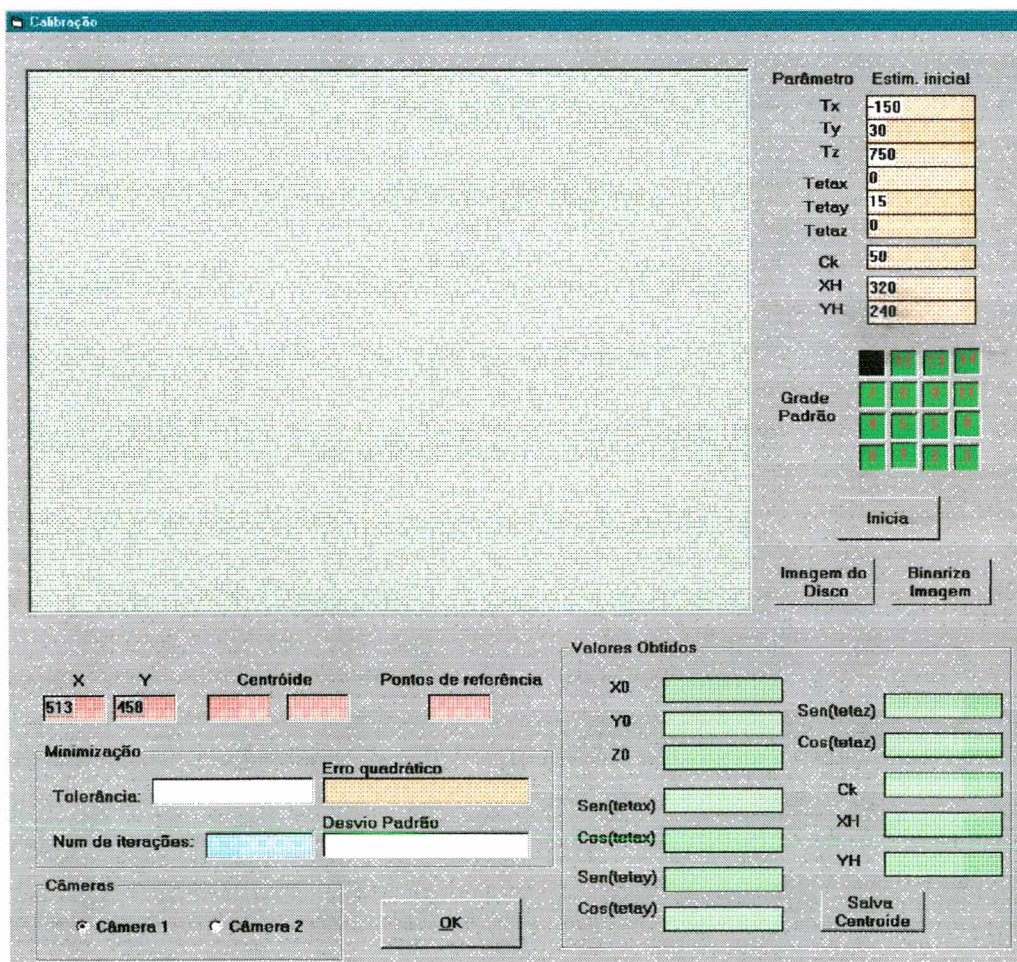


Figura 4.5 : Software de calibração

Funcionamento do software:

- 1) Comando “Imagem do Disco” : Adquire imagem do disco ou imagem ao vivo.
- 2) Comando “Binariza” : Transforma imagem de tons de cinza em uma imagem preta e branca.
- 3) Estimativas : Nas caixas de texto no canto superior direito da tela são atribuídas estimativas iniciais aos parâmetros de calibração.
- 4) Comando Inicia : Calcula valores otimizados dos parâmetros de calibração, os quais são apresentados nas caixas de texto no canto inferior direito da tela.

Resultados fornecidos:

- 1) Erroquadrático : Soma quadrática dos resíduos do sistema de equações.
- 2) Tolerância : Diferença entre as soluções das duas últimas iterações do sistema.
- 4) Desvio padrão : Desvio padrão dos resíduos do sistema.
- 5) Num. de iterações : Número de iterações necessárias para a convergência do sistema.

4.5 Testes de validação

4.5.1 Repetitividade da calibração

Testes de repetitividade foram realizados para validar o algoritmo de calibração, o anexo A.1 mostra uma tabela com o resultado de 5 medições do padrão de calibração.

Após a calibração da posição e orientação das câmaras, as coordenadas 3D dos pontos de calibração foram calculadas por triangulação, os pontos homólogos foram identificados através dos centróides calculados em cada uma das imagens. Os resultados das medições mostram que a repetitividade do sistema calculada com 95% de confiança é inferior a 0,03 mm para a coordenada Z e inferior a 0,01 mm para as coordenadas X e Y.

4.5.2 Experimentos com padrão deslocado

Um segundo teste de validação foi realizado através do deslocamento do padrão de calibração. A Tabela 4.1 mostra os resultados de 5 medições, onde a distância entre o padrão e as câmaras em cada experimento é incrementada em passos de 5 mm. A calibração foi realizada apenas uma vez para a primeira posição. Nas demais posições os pontos do padrão foram medidos sem que uma nova calibração fosse efetuada. Para deslocar o padrão de calibração foi utilizada uma mesa micrométrica.

Os erros foram calculados sobre as coordenadas reais medidas na MMC (VVC).

Deslocamento (mm)	Tendência [mm]			Desvio padrão (s) dos erros das coordenadas [mm]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
0	-0,0000147	0,000597	0,0000290	±0,0124	±0,0112	±0,0413
5	0,00120	-0,0012	5,0021	±0,0145	±0,0109	±0,0355
10	0,00138	-0,0013	10,0012	±0,0154	±0,0127	±0,0405
15	0,00123	-0,0017	15,0013	±0,0156	±0,0131	±0,0421
20	0,00126	-0,0014	19,9946	±0,0177	±0,0164	±0,0424

Tabela 4.1 : Resultados de medição com padrão deslocado

O resultado dos experimentos levam a concluir que o desvio padrão dos erros calculados sobre os pontos de medições independentes é inferior a 0,05 mm para a coordenada Z, e não chega a 0,02 mm nas coordenadas X e Y.

CAPÍTULO 5. ALGORITMO PARA MEDIÇÃO DE FORMAS 3D POR TOPOGRAMETRIA

Este capítulo apresenta o algoritmo desenvolvido, implementado e utilizado para medição de coordenadas espaciais a partir da Topogrametria. Para que este algoritmo possa ser utilizado é necessário que as posições espaciais das câmaras já tenham sido determinadas por calibração. O algoritmo possui três etapas:

- Processar as imagens das franjas adquiridas pelas duas câmaras CCD.
- Determinar os pontos homólogos das imagens processadas.
- Calcular as coordenadas espaciais.

5.1 Processamento das imagens das franjas

5.1.1 Projeção de franjas

Um projetor Leica (Anexo C.3) foi utilizado para projetar dois padrões de franjas sobre a peça a medir: um padrão de franjas verticais e outro de franjas horizontais. As grades utilizadas para projetar as franjas na peça a medir são “slides” obtidos fotograficamente. A densidade das linhas depende da resolução que se pretende obter. Grades com maior densidade resultam em maior resolução e são utilizadas em medições onde é necessário um nível maior de detalhamento.

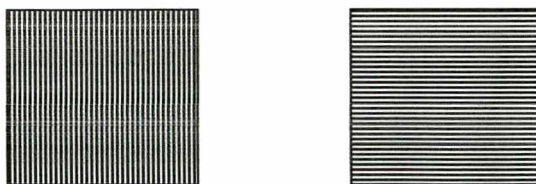


Figura 5.1 : Padrões de franjas

A mesma grade é utilizada na projeção dos dois padrões de franjas, onde a troca de padrão é feita com a simples rotação do mesmo slide em 90° .

Apesar das franjas projetadas serem binárias (franjas claras e escuras que representam um sinal quadrado), deve-se buscar um perfil de intensidades senoidal das franjas na imagem. Para tal, desfoca-se levemente o projetor de “slides” (Figura 5.2). A desfocalização das franjas deve ser feita pelo projetor visto que as câmaras não devem ser manipuladas após a calibração.

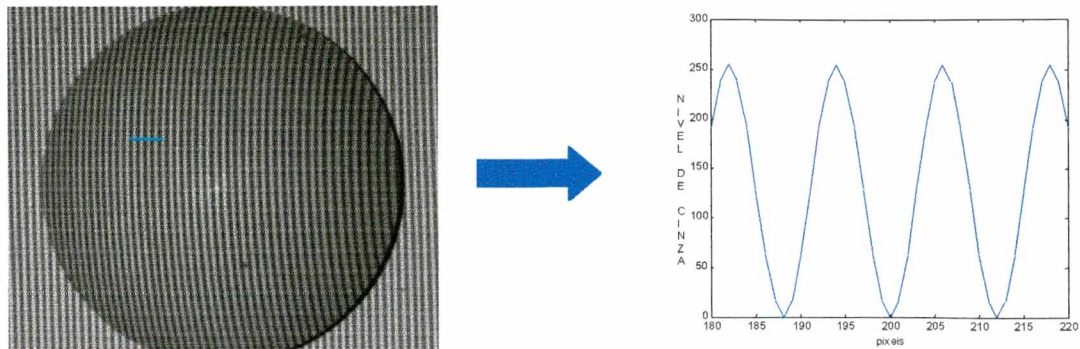


Figura 5.2 : Perfil da projeção de franjas verticais sobre uma superfície esférica

As franjas, constituídas de linhas claras e escuras, podem ser analisadas de forma clássica. Atribui-se arbitrariamente a uma das franjas a ordem zero, sendo as demais franjas referenciadas a esta, podendo ter ordens positivas ou negativas.

No caso do algoritmo de determinação dos pontos homólogos o objetivo é achar as posições correspondentes nas imagens de franjas de duas câmaras. Neste caso a escolha da franja de ordem zero não é norteadada por uma propriedade física do objeto medido, mas apenas por um critério que assegure que haja correspondência entre as duas imagens, isto é, a franja de ordem zero adotada em cada imagem deve corresponder à mesma franja fisicamente projetada na peça. Esta correspondência é feita através de um ponto que pode ser identificado por uma pequena marca colada sobre a peça ou qualquer ponto característico da própria peça, suficientemente visível em ambas as imagens.

5.1.2 Mapas de fase

O método de deslocamento de fase (seção 2.2.5) é utilizado para quantificação de mapas de franjas. A quantificação é eficiente, independentemente do número, forma ou densidade das franjas.

O algoritmo de quatro passos é empregado para o cálculo de fase.

O deslocamento em milímetros equivalente a um ciclo de fase é determinado através de uma calibração experimental. O projetor de franjas é colocado sobre um dispositivo de deslocamento vertical e horizontal. O deslocamento das franjas verticais é feito movimentando o projetor de “slides” na direção horizontal e o das franjas horizontais, na direção vertical. O deslocamento referente a um ciclo de fase é diferente para as duas direções.

Antes de cada calibração uma imagem de referência deve ser adquirida. A calibração consiste em observar o resultado da subtração da imagem de referência das imagens ao vivo adquiridas enquanto o projetor é deslocado. O efeito deste procedimento é observado na tela do computador, onde as franjas são movidas até que a franja de ordem i ocupe a posição da franja de ordem $i+1$. Neste momento uma nova imagem escura é obtida. Este deslocamento é equivalente a uma mudança de fase de 2π , ou simplesmente um ciclo de fase.

Em termos práticos o cálculo de fase é efetuado por meio de processamento digital de imagens como segue :

- Aquisição de quatro imagens da peça com um dos padrões de franjas projetados correspondendo a incrementos de fase iguais a 0 , $\pi/2$, π e $3\pi/2$. Estas imagens com fase defasada são obtidas através do deslocamento do projetor de slides na direção perpendicular às franjas, o deslocamento é feito com uma mesa micrométrica. Este procedimento é feito para as duas câmaras simultaneamente.
- Cálculo dos mapas de fase para as imagens de ambas as câmaras (seção 2.2.5).
- Reposicionamento do slide girado de 90° para projeção do novo padrão.
- Aquisição de quatro imagens da peça com o novo padrão projetado correspondendo a incrementos de fase iguais a 0 , $\pi/2$, π e $3\pi/2$. Mais uma vez as imagens defasadas são obtidas através do deslocamento do projetor de slides na direção perpendicular às franjas. Este procedimento é feito para as duas câmaras simultaneamente.
- Cálculo dos mapas de fase para as imagens de ambas as câmaras (seção 2.2.5).

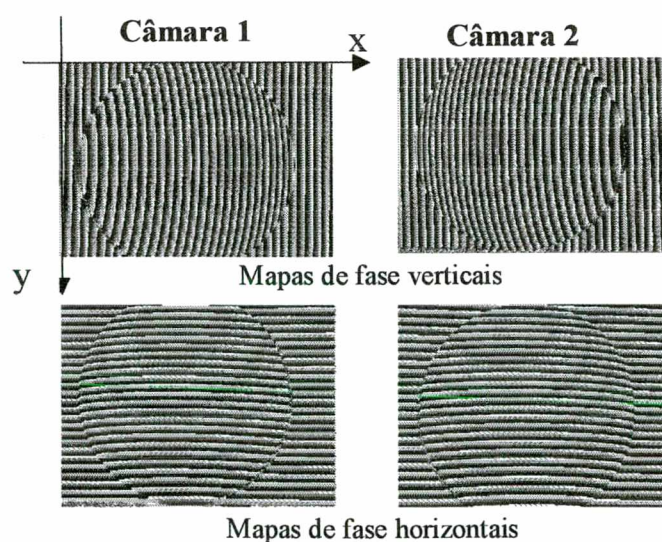


Figura 5.3 : Mapas de fase

É aconselhável que o objeto a ser medido seja colocado sobre um fundo preto no momento da medição. Desta forma a imagem de fundo (totalmente escura) pode ser separada da imagem do objeto através dos níveis de cinza da imagem, ou seja apenas pixels acima de um certo nível de cinza são selecionados para a medição. Este procedimento ajuda a impedir que ruídos causados pelo fundo da imagem contaminem o cálculo das coordenadas 3D, e apenas as coordenadas do objeto sejam medidas.

5.1.3 Remoção do salto de fase

Os mapas de fase, como pode ser observado na Figura 5.3, estão representados em níveis de cinza que variam de 0 a 255. Estes valores de nível de cinza tendem a se repetir sequencialmente a cada nova franja, gerando um perfil tipo “dente de serra” que, na passagem para cada nova franja, possui uma descontinuidade denominada “salto de fase”. A ambigüidade conseqüente da repetição destes valores de fase a cada nova franja pode ser resolvida através de algoritmos que levam à determinação da ordem de franja absoluta.

A remoção do salto de fase é feita em todos os pixels dos quatro mapas de fase, ou seja, nos mapas de franjas verticais e horizontais das duas câmaras.

5.2 Algoritmo de identificação dos pontos homólogos

Quando se conhece a fase absoluta dos pontos nas imagens das duas câmaras é possível encontrar pontos correspondentes destas imagens. Como cada ponto é caracterizado por um par ordenado (x, y) , são necessários dois padrões de franjas para a plena determinação do par correspondente (ponto homólogo).

Os mapas de fase absoluta, gerados a partir de franjas verticais, têm a fase variando predominantemente no sentido horizontal. Através destes mapas é possível a determinação da coordenada x do ponto homólogo. O contrário ocorre na determinação da coordenada y , que é feita através dos mapas gerados a partir de franjas horizontais, os quais tem a fase variando predominantemente na direção vertical.

Antes de iniciar a procura dos pontos homólogos seleciona-se uma malha de pontos sobre a região de interesse na imagem de uma das câmaras. Este procedimento, além de economizar tempo de processamento, elimina possíveis problemas causados por ruídos presentes na imagem de fundo.

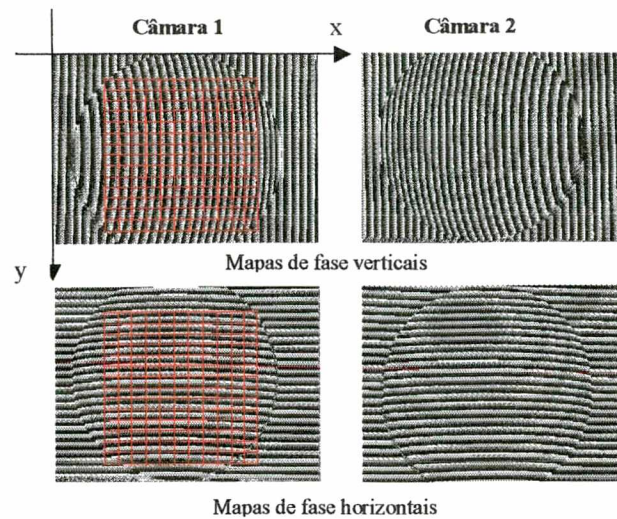


Figura 5.4 : Malha de pontos selecionados para medição

Os valores de fase dos pontos da malha selecionada nas imagens da primeira câmara são armazenados em duas matrizes (FVC1 e FHC1). A procura do ponto homólogo é feita sobre os pixels dos mapas de fase da imagem da segunda câmara através de um algoritmo específico. As matrizes que contém os valores de fase das imagens da segunda câmara (FVC2 e FHC2) possuem as mesmas dimensões da imagem (640 x 480 pixels).

É importante ressaltar que os pontos homólogos não correspondem necessariamente a valores inteiros das coordenadas dos pixels da segunda imagem. A posição ideal do ponto homólogo pode estar entre pixels. Para determinar a parte fracionária da posição do ponto homólogo o algoritmo determina uma região quadrada de quatro pixels que contenha este ponto homólogo e calcula suas coordenadas através de interpolação bilinear.

5.2.1 Algoritmo de procura

Em linhas gerais a procura do intervalo que contém o ponto homólogo (i_{hom}, j_{hom}) é feita iterativamente na seguinte sequência de passos :

- Determinação do sentido crescente das matrizes FVC2 e FHC2.
- Determinação do sentido da procura da posição i na direção horizontal em FVC2 pelo teste : Se $FVC2(i, j) - FVC1(i, j) > 0$, a procura é feita no sentido crescente de FVC2. Se $FVC2(i, j) - FVC1(i, j) < 0$, a procura é feita no sentido decrescente de FVC2.

- Escolhido o sentido de procura, o algoritmo percorre a respectiva linha da matriz de ordens de franja absolutas (FVC2) até encontrar um intervalo entre dois pixels consecutivos que contenha o valor de fase vertical procurado. Caso $FVC2 = FVC1$, a procura automaticamente passa a ser na direção vertical.
- Partindo-se da posição i encontrada, o próximo passo é a determinação do sentido de procura da posição j na direção vertical em FHC2 :
Se $FHC2(i, j) - FHC1(i, j) > 0$, a procura é feita no sentido crescente de FHC2.
Se $FHC2(i, j) - FHC1(i, j) < 0$, a procura é feita no sentido decrescente de FHC2.
- Escolhido o sentido de procura da posição j , o algoritmo percorre a respectiva linha de FHC2 até encontrar um intervalo entre dois pixels consecutivos que contenha o valor de fase horizontal procurado. Caso $FHC2 = FHC1$, a procura automaticamente volta a ser na direção horizontal.

O processo é repetido iterativamente até que o mesmo ponto (pixel) em FVC2 e FHC2 satisfaça as condições de procura, ou seja, limite a região que contém os valores de fase vertical e horizontal procurados. Caso nenhum pixel satisfaça esta condição em 20 iterações, este ponto é abandonado e um próximo ponto da malha passa a ser alvo da procura.

A pesquisa é feita para todos os pontos da malha selecionada na imagem da câmara 1, e para cada um destes pontos o algoritmo encontra uma região de quatro pixels vizinhos na imagem da câmara 2 que contém o ponto homólogo.

5.2.2 Interpolação bilinear

Através de interpolação bilinear é possível alcançar uma resolução subpixel na determinação do ponto homólogo.

Os quatro pixels vizinhos determinados pelo algoritmo de procura são interpolados dois a dois. Duas retas são traçadas entre os pixels interpolados e o ponto homólogo é determinado pela interseção destas duas retas.

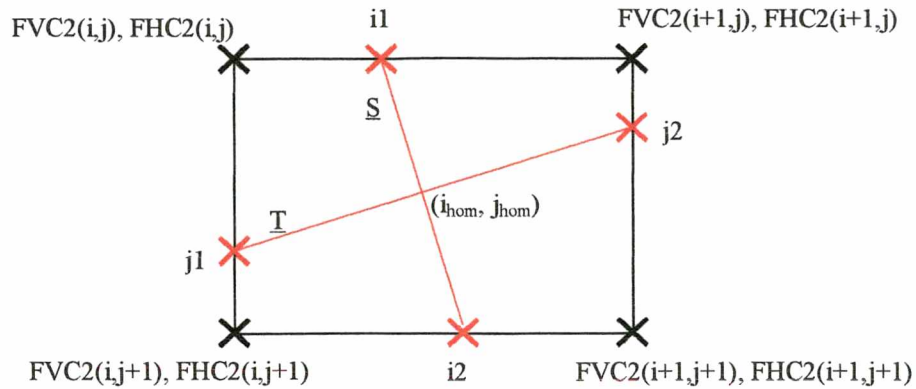


Figura 5.5 : Interpolação bilinear

Cada pixel possui dois valores de fase associados. A interpolação na direção horizontal é feita com valores de fase vertical, visto que o intervalo na direção horizontal é determinado a partir da imagem de franjas verticais, ao contrário a interpolação na direção vertical é feita com valores de fase horizontal.

INTERPOLAÇÃO DA POSIÇÃO DA FASE HORIZONTAL:

$$\begin{aligned}
 i1 &= \frac{FVC1 - FVC2(i, j)}{FVC2(i+1, j) - FVC2(i, j)} + i \\
 i2 &= \frac{FVC1 - FVC2(i, j+1)}{FVC2(i+1, j+1) - FVC2(i, j+1)} + i
 \end{aligned}
 \quad \Rightarrow \quad
 \begin{aligned}
 \text{Reta S :} \\
 j_{\text{hom}} &= \frac{i_{\text{hom}} - i1}{i2 - i1} + j
 \end{aligned}
 \quad (5.1)$$

INTERPOLAÇÃO DA POSIÇÃO DA FASE VERTICAL:

$$\begin{aligned}
 j1 &= \frac{FHC1 - FHC2(i, j)}{FHC2(i, j+1) - FHC2(i, j)} + j \\
 j2 &= \frac{FHC1 - FHC2(i+1, j)}{FHC2(i+1, j+1) - FHC2(i+1, j)} + j
 \end{aligned}
 \quad \Rightarrow \quad
 \begin{aligned}
 \text{Reta T :} \\
 j_{\text{hom}} &= (i_{\text{hom}} - i).(j2 - j1) + j1
 \end{aligned}
 \quad (5.2)$$

Onde :

FVC1 : Valor de fase vertical na imagem da câmara 1 do pixel procurado.

FHC1 : Valor de fase horizontal na imagem da câmara 1 do pixel procurado.

A interseção das retas S e T permite determinar o as coordenadas em pixels do ponto homólogo :

$$i_{\text{hom}} = \frac{i(j_2 - j_1)(i_2 - i_1) + (j - j_1)[(i_2 - i_1) - i_1]}{(j_2 - j_1)(i_2 - i_1) - 1} \quad (5.3)$$

$$j_{\text{hom}} = (i_{\text{hom}} - i).(j_2 - j_1) + j_1 \quad (5.4)$$

As coordenadas do ponto homólogo no SCC (x_{hom} , y_{hom}) são determinadas a partir do fator de conversão dado por (3.1) e (3.2):

$$x_{\text{hom}} = \frac{i_{\text{hom}}}{S_x} \quad (5.5)$$

$$y_{\text{hom}} = \frac{j_{\text{hom}}}{S_y} \quad (5.6)$$

5.3 Cálculo das coordenadas 3D

Após a determinação das coordenadas dos pontos homólogos no SCC, o cálculo das coordenadas 3D fica restrito à resolução do sistema de equações (3.17). O cálculo baseia-se na resolução de um sistema de quatro equações que descrevem as linhas de projeção das quatro coordenadas dos pontos homólogos.

A solução por mínimos quadrados permite encontrar o ponto de interseção das linhas de projeção com minimização do erro. O sistema é resolvido para os ‘n’ pontos homólogos encontrados pelo “Algoritmo de procura”. As ‘n’ coordenadas (X, Y, Z) resultantes deste sistema de equações são armazenadas em um arquivo texto (*.txt).

5.4 Geração do modelo geométrico

O programa Surfer [25] foi utilizado para criação dos modelos geométricos. O software lê os dados de um arquivo texto e gera superfícies utilizando diferentes métodos de interpolação e aproximação.

O software ainda tem opção de criar arquivos AutoCAD [.DXF], Windows Metafile [.WMF], Windows Clipboard [.CLP] e Computer Graphics Metafile [.CGM].

5.5 Teste de validação do algoritmo de determinação dos pontos homólogos

Testes de repetitividade foram realizados com o objetivo de avaliar o comportamento do algoritmo.

Na imagem de uma das câmaras um ponto foi selecionado e cinco experimentos independentes foram realizados, ou seja, a aquisição de imagens e o deslocamento de fase foram repetidos a cada novo experimento. Os valores mostrados na Tabela 5.1 correspondem às coordenadas do ponto homólogo dos 5 experimentos.

Experimento	x (mm)	y (mm)
1	2,69065	1,15814
2	2,69008	1,15895
3	2,69141	1,15811
4	2,69251	1,15883
5	2,69157	1,15883
Desvio padrão (s)	0,0009	0,0007
Repetitividade (t.s)	0,0025	0,0020

Tabela 5.1 : Repetitividade do algoritmo de determinação dos pontos homólogos

O desvio padrão calculado para a amostra de dados mostra que a repetitividade do algoritmo com 95 % de confiança ($t \approx 2.8$) é menor que 0,003 mm, o equivalente a 0,2 pixel.

CAPÍTULO 6. DESEMPENHO METROLÓGICO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO TOPOGRAMÉTRICO

6.1 Fontes de incerteza

Para melhor analisar e quantificar as várias fontes de incerteza do processo de medição é necessário caracterizá-lo muito bem, o que pode ser sintetizado com a ajuda do seguinte diagrama:

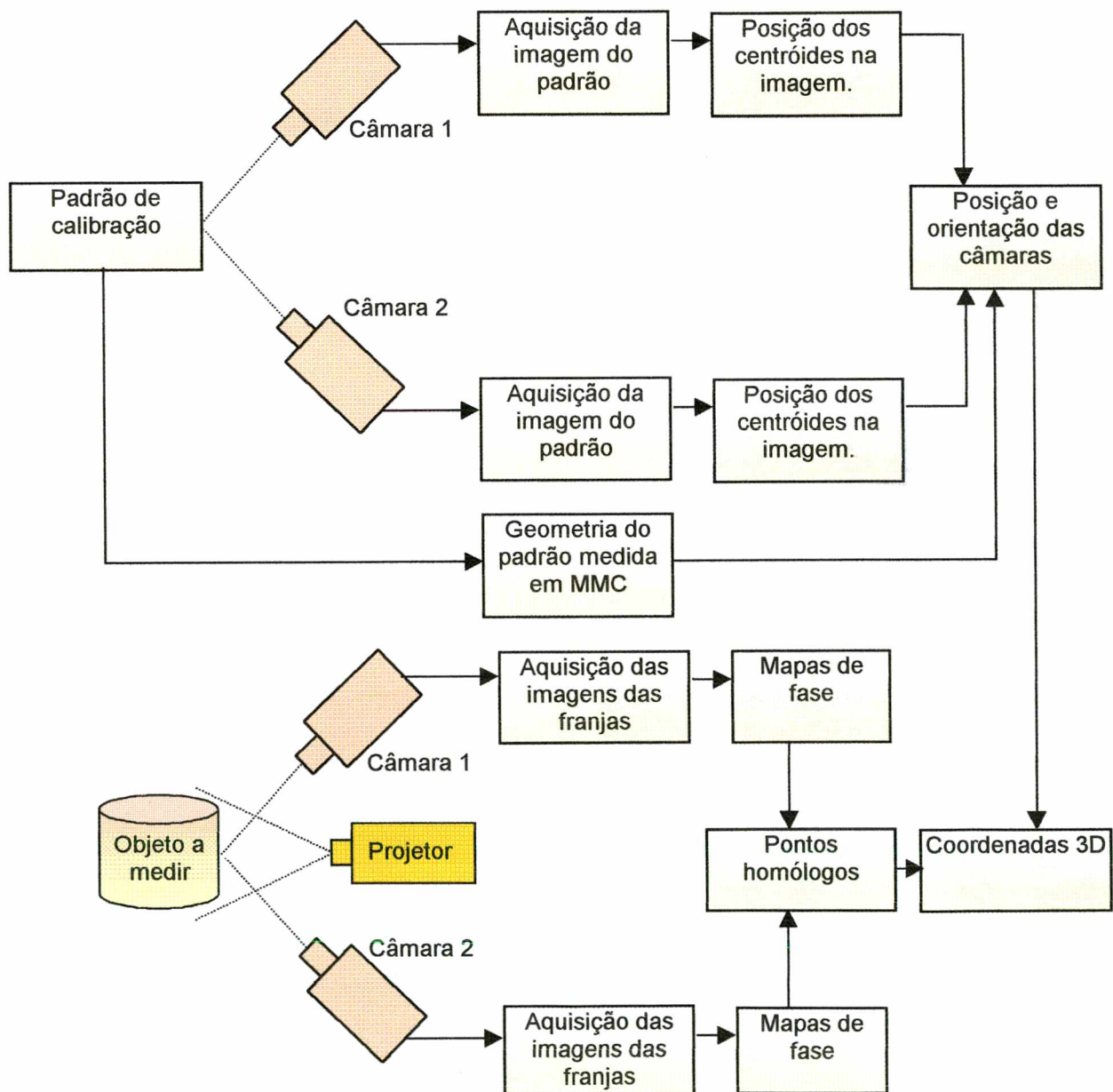


Figura 6.1 : Diagrama do processo de medição por Topogrametria

O processo de medição pode ser dividido em duas etapas: calibração da posição e orientação das câmaras e cálculo das coordenadas 3D. As coordenadas do padrão de calibração e as coordenadas dos centróides são os dados de entrada do algoritmo de calibração. As coordenadas dos pontos homólogos e os parâmetros de calibração são dados de entrada da segunda etapa. As fontes de incerteza do sistema estão diretamente relacionadas aos dados de entrada de cada etapa.

As incertezas relacionadas com os parâmetros resultantes da calibração da posição e orientação das câmaras podem ser estimadas a partir das incertezas dos dados de entrada: posição dos centróides e geometria do padrão de calibração. As incertezas das coordenadas 3D de cada ponto medido dependem das incertezas dos algoritmos de determinação dos pontos homólogos e das incertezas relativas à calibração da posição e orientação das câmaras. Neste trabalho, para fins de estimativas de incertezas, as incertezas relativas à calibração da posição e orientação das câmaras serão tratadas como incertezas internas do processo de medição, e não serão explicitadas, mas consideradas implicitamente na estimativa das incertezas das coordenadas 3D.

Sendo assim, as fontes de incertezas primárias do sistema restringem-se às incertezas associadas às coordenadas dos centróides, às coordenadas do padrão de calibração e às coordenadas dos pontos homólogos.

6.1.1 Diagrama de incertezas

As fontes de incerteza do sistema de medição estão a seguir representadas no diagrama do tipo “Espinha de peixe” mostrado na Figura 6.2.

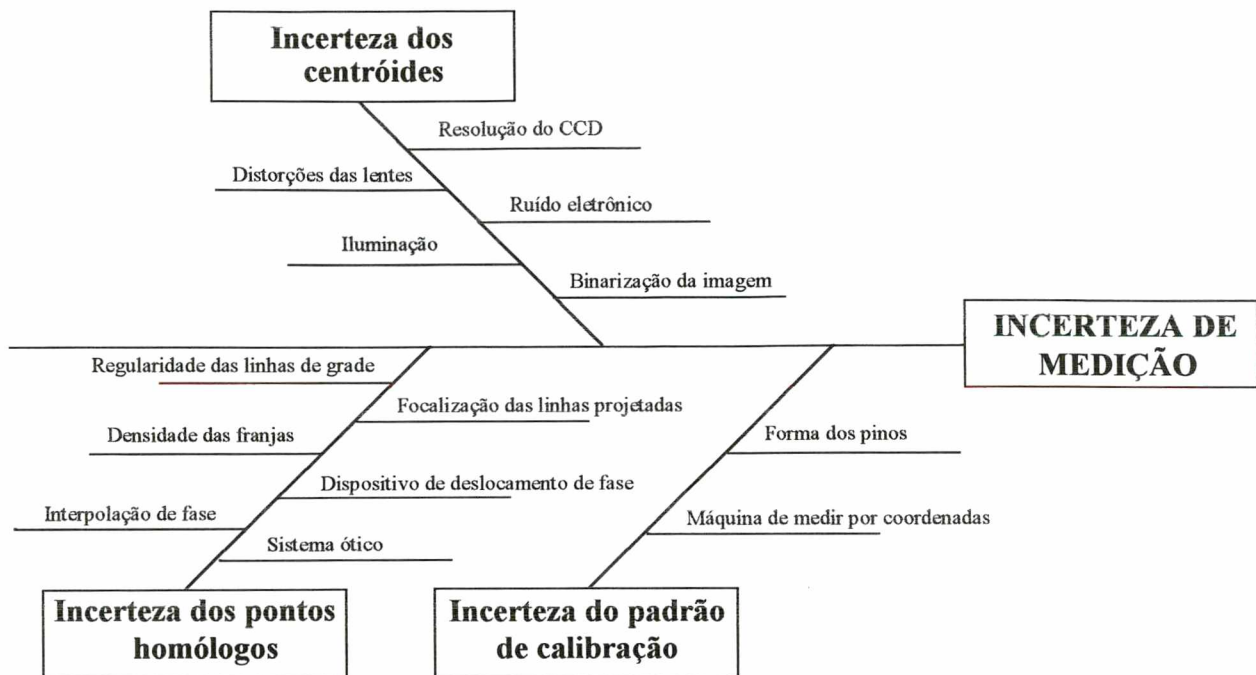


Figura 6.2 : Diagrama “Espinha de peixe” das fontes de incerteza do sistema de medição Topográfico

6.2 Avaliação das fontes de incertezas primárias do sistema de medição Topográfico

6.2.1 Incerteza das coordenadas do padrão de calibração

A incerteza com que se conhece as coordenadas dos centros da seção circular da extremidade de medição de cada pino depende do sistema utilizado para a medição destas coordenadas e do erro de forma dos pinos medidos. O Anexo C.1 mostra a disposição física destes pinos, assim como as coordenadas dos seus centros medidos por uma MMC Zeiss modelo UPM 550. Todas as coordenadas referem-se à origem do padrão de calibração que foi escolhida como um dos vértices da sua chapa da base.

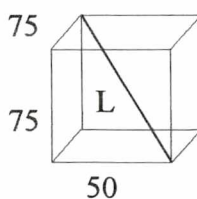
- A incerteza expandida (95%) da MMC dada pelo seu certificado de calibração pode ser estimada por :

$$U_{95\%}(L) = 1,2 + 21,4 \cdot 10^{-6} \cdot L < \pm 5,5 \mu\text{m}$$

O valor de L foi estimado a partir das dimensões do padrão de calibração.

Dimensões da placa onde estão dispostos os pinos : 75 x 75 mm

Altura máxima dos pinos : 50 mm



Logo, $L = 117 \text{ mm}$ e $U_{95\%}(117) = \pm 3,7 \text{ }\mu\text{m}$.

- Erro de forma dos pinos :

Para medir as coordenadas do centro da seção circular do topo dos pinos do padrão de calibração, a máquina de medir por coordenadas apalpa alguns pontos ao longo da superfície cilíndrica do pino e na superfície plana do topo, calcula a equação da superfície cilíndrica e, da sua interseção com o plano do topo obtém as coordenadas do centro. A incerteza expandida (95%) deste processo depende fortemente do erro de forma do pino e de outros parâmetros da máquina. Neste caso, incertezas típicas da ordem de $\pm 9 \text{ }\mu\text{m}$ foram estimadas para cada coordenada do centro da seção do topo dos pinos.

- Incerteza expandida combinada das coordenadas do padrão

A incerteza expandida combinada das coordenadas do padrão é classificada como tipo B e é estimada pela soma quadrática das incertezas provenientes do erro de forma e da máquina de medir por coordenadas.

$U_{95\%} = \sqrt{9^2 + 3,7^2} \approx \pm 10 \text{ }\mu\text{m}$, o que leva a uma incerteza padrão combinada da ordem de $\pm 5 \text{ }\mu\text{m}$.

6.2.2 Incerteza padrão das coordenadas dos centróides

As incertezas com que são determinadas as coordenadas do centróides resultam da ação combinada dos seguintes fatores:

- Resolução do CCD
- Distorções da lente
- Ruído eletrônico
- Não uniformidade da iluminação
- Patamar de binarização da imagem

O sistema ótico, assim como a iluminação do objeto e a binarização da imagem são fontes de incerteza que ocorrem simultaneamente, por isso pode se tornar difícil explicitar separadamente os efeitos de cada uma destas fontes de incerteza e depois combiná-los. Sendo assim, foram avaliadas experimentalmente a combinação de todas estas fontes de incerteza simultaneamente.

A incerteza associada às coordenadas do centróides foi determinada por um procedimento tipo A, estimada a partir da aquisição de várias imagens onde os fatores que têm influência sobre a incerteza foram variados dentro de uma faixa de valores típicos. O centróide de um mesmo ponto foi calculado e o desvio padrão (s) das medições foi estimado como incerteza padrão.

Imagem	X (pixel)	Y (pixel)
1	365,21	307,83
2	365,20	307,82
3	365,21	307,85
4	365,21	307,82
5	365,23	307,86
6	365,20	307,87
7	365,15	307,87
8	365,25	307,88
9	365,22	307,86
10	365,22	307,87
s	$\pm 0,0258$	$\pm 0,0221$

Tabela 6.1 : Avaliação da incerteza na determinação dos centróides

Considerando as fontes de incerteza acima citadas, a incerteza padrão tipo A para as coordenadas do centróide é da ordem de apenas 0,026 pixel.

A ausência de componentes sistemáticas expressivas no algoritmo de determinação do centróide foi verificada através de imagens simuladas onde círculos perfeitos foram matematicamente simulados em posições rigorosamente bem conhecidas.

6.2.3 Incerteza padrão da determinação dos pontos homólogos

Assim como na determinação das coordenadas do centróide, a determinação das coordenadas dos pontos homólogos depende das imagens adquiridas para o cálculo dos mapas de fase, isto implica que há influência do sistema ótico na incerteza. Além do sistema ótico existem outras fontes de incerteza provenientes do cálculo dos mapas de fase:

- Regularidade das linhas da grade que é projetada sobre a peça (passo constante em toda a grade).

- Incerteza do dispositivo de deslocamento de fase (histerese, resolução, direção de deslocamento).
- Focalização das linhas projetadas (perfil retangular das linhas de grade).
- Densidade elevada de franjas (devido ao ângulo de observação da câmara).
- Interpolação de fase.

Aqui, também pela dificuldade em avaliar separadamente a influência de cada contribuição de incertezas, optou-se pela avaliação experimental da ação combinada de todas as fontes. Para isto, várias medições repetidas foram realizadas, e as incertezas padrão para as coordenadas dos pontos homólogos foram estimadas através do desvio padrão (Tabela 5.1). O valor foi estimado em aproximadamente 0,07 pixel, o que corresponde a apenas 0,9 μm no sensor CCD da câmara.

A parcela sistemática da determinação dos pontos homólogos não pôde ser perfeitamente caracterizada através deste experimento. Será considerada apenas na avaliação global do sistema e estará combinada com as demais fontes de incertezas sistemáticas.

6.3 Propagação das incertezas

Para caracterizar adequadamente o desempenho metrológico do sistema de medição Topogramétrico é necessário estimar os efeitos das incertezas estimadas para as grandezas primárias sobre as coordenadas dos pontos efetivamente medidos.

Na ausência de uma superfície geométrica padrão, com pontos de referência bem definidos e conhecidos, optou-se por utilizar simulação numérica. Os dados utilizados na simulação (coordenadas dos centróides e coordenadas dos pontos homólogos) foram extraídos de quatro medições reais do padrão de calibração, realizadas em diferentes ângulos de observação (ângulo entre câmaras), mantendo a distância de medição utilizada (aproximadamente 900 mm). A partir destas medições, outras 50 amostras foram simuladas através do acréscimo de erro aleatório nas fontes de incertezas primárias do sistema.

6.3.1 Análise dos efeitos individuais das fontes de incerteza

Para identificar a principal fonte de incertezas do sistema, erros aleatórios foram introduzidos separadamente em cada uma das fontes de incertezas em simulações isoladas.

Os erros aleatórios introduzidos são da ordem da incerteza padrão estimada para cada respectiva fonte de incerteza: erros na ordem de $\pm 0,03$ pixel foram introduzidos nas coordenadas dos centróides, da ordem de $\pm 0,9 \mu\text{m}$ ($0,07$ pixel) nas coordenadas dos pontos homólogos e $\pm 0,005$ às coordenadas do padrão de calibração.

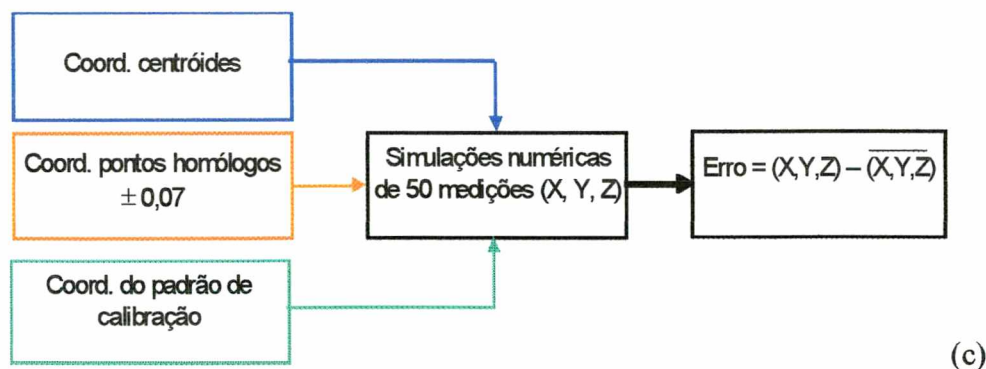
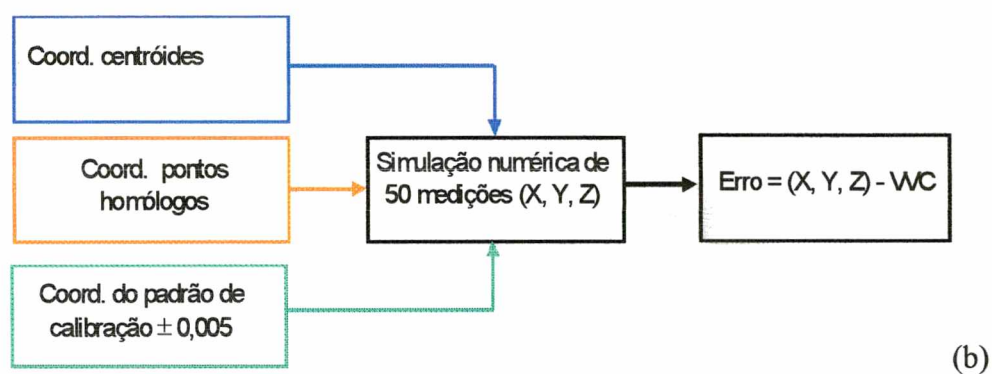
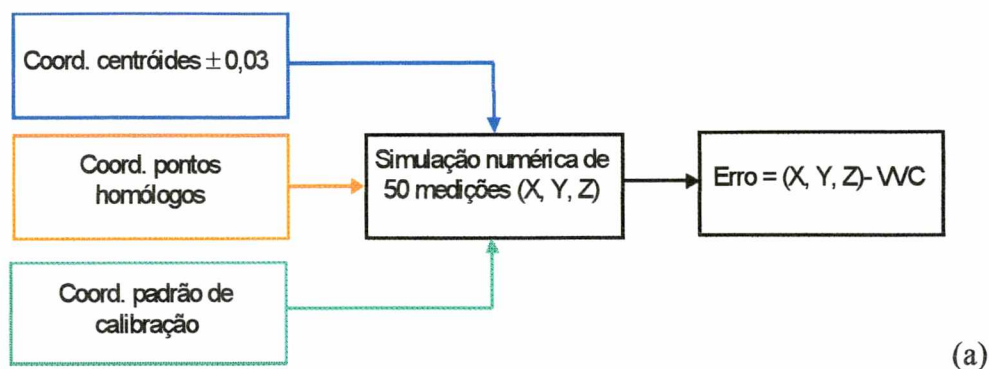


Figura 6.3 : Propagação de incertezas: (a) Simulação 1, (b) Simulação 2, (c) Simulação 3.

Foram calculados a média e o desvio padrão dos erros de 50 medições para cada ponto do padrão (13 pontos). Os resultados abaixo mostram o desvio padrão médio dos erros das 13 coordenadas do padrão.

Nas simulações onde são introduzidos erros nas coordenadas do padrão de calibração e coordenadas dos centróides, os erros de medição são calculados em relação às coordenadas do padrão de calibração medidas em MMC (VVC). Nas simulações onde são introduzidos erros aleatórios às coordenadas dos pontos homólogos, os erros de medição são calculados em relação às coordenadas do padrão medidas no sistema Topogramétrico $(\overline{X}, \overline{Y}, \overline{Z})$.

	Simulação 1			Simulação 2			Simulação 3		
	Tendência [mm]			Tendência [mm]			Tendência [mm]		
Ângulos	T _{xcc}	T _{ycc}	T _{zcc}	T _{xcp}	T _{ycp}	T _{zcp}	T _{xph}	T _{yph}	T _{zph}
15°	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	-0,0002	0,0000	0,0003	-0,0004	-0,0013
18°	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0000	-0,0000	-0,0002	-0,0002	0,0004	-0,0014
20°	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0001	-0,0003	-0,0000	0,0001	-0,0006	-0,0029
25°	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0002	-0,0002	-0,0000	0,0003	-0,0001	-0,0015

Tabela 6.2 : Tendência dos resultados das simulações

	Simulação 1			Simulação 2			Simulação 3		
Ângulos	Desvio padrão médio (mm)			Desvio padrão médio (mm)			Desvio padrão médio (mm)		
	S _{xcc}	S _{ycc}	S _{zcc}	S _{xcp}	S _{ycp}	S _{zcp}	S _{xph}	S _{yph}	S _{zph}
15°	±0,0039	±0,0034	±0,0227	±0,0028	±0,0030	±0,0039	±0,0102	±0,0092	±0,0613
18°	±0,0039	±0,0037	±0,0204	±0,0031	±0,0029	±0,0034	±0,0108	±0,0094	±0,0576
20°	±0,0039	±0,0034	±0,0180	±0,0030	±0,0031	±0,0033	±0,0109	±0,0097	±0,0498
25°	±0,0040	±0,0033	±0,0164	±0,0027	±0,0030	±0,0032	±0,0110	±0,0099	±0,0435

Tabela 6.3 : Desvio padrão dos resultados das simulações

A partir das simulações é possível concluir que a determinação do ponto homólogo é claramente a fonte de incerteza de maior influência no sistema de medição. Observando estes resultados graficamente (Figura 6.4) nota-se maior sensibilidade na coordenada Z e que, a incerteza nesta coordenada tende a diminuir com o aumento do ângulo de medição.

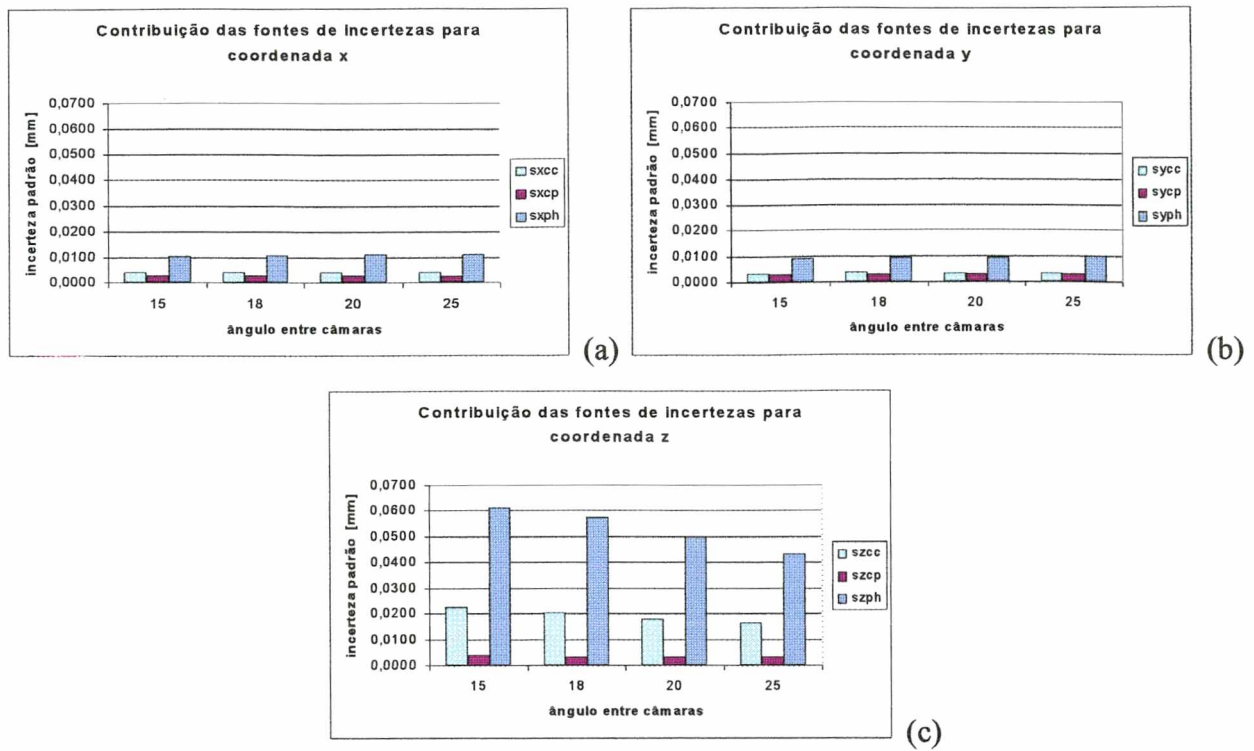
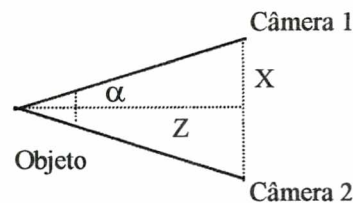


Figura 6.4 : Influência das fontes de incerteza: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

O efeito que causa a variação da incerteza em função do ângulo de medição é explicado através do princípio da triangulação. Supondo a mais simples situação de medição, onde as câmaras estão dispostas na mesma altura, mesma distância do objeto e com um ângulo de observação α .



Esta configuração leva à simples relação geométrica :

$$Z = \frac{X}{\operatorname{tg}(\alpha)} \quad (6.1)$$

Da qual é possível dizer que :

$$\frac{\partial Z}{\partial \operatorname{tg}(\alpha)} = \frac{-1}{\operatorname{tg}(\alpha)^2} \quad (6.2)$$

A variação de Z é inversamente proporcional ao valor da tangente. Como o valor da tangente, dentro do intervalo $0 < \alpha < 90^\circ$, tende a aumentar com o ângulo, pode-se concluir que a variação de Z diminui quando o ângulo aumenta. A partir desta afirmação, conclui-se que a incerteza da coordenada Z também diminua com o aumento do ângulo de medição entre as câmaras.

Espera-se menor sensibilidade na coordenada X e Y frente a variação angular pois, a variação destas coordenadas não depende do ângulo α .

6.3.2 Estimativa da incerteza padrão combinada

Os mesmos níveis de erros aleatórios foram introduzidos simultaneamente em todas as fontes de incerteza.

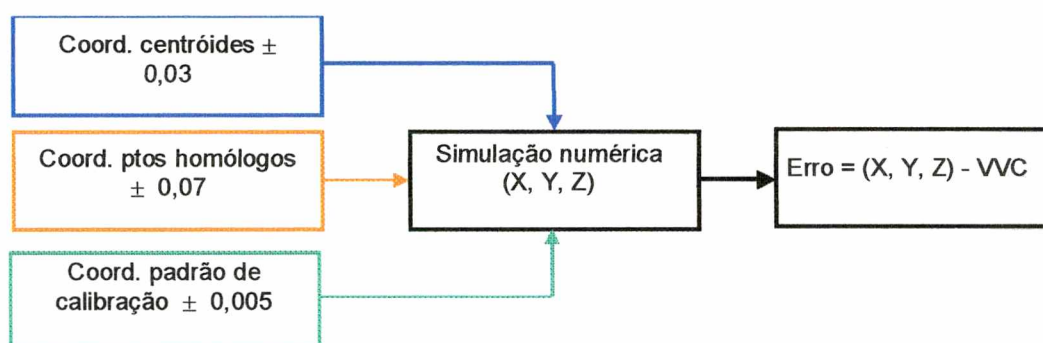


Figura 6.5 : Propagação simultânea de todas as fontes de incertezas

Para fins comparativos a incerteza padrão, já calculada a partir da combinação dos efeitos individuais, foi confrontada aos resultados obtidos a partir da influência simultânea de todas as fontes de incertezas. A combinação dos efeitos individuais foi feita considerando estas fontes de incerteza como estatisticamente independentes, isto é, não correlacionadas.

A análise foi feita em diferentes ângulos de medição. A idéia é demonstrar que ambos procedimentos levam a resultados similares, e verificar a hipótese de que a independência estatística para estas fontes de incerteza é correta. O primeiro procedimento tem a vantagem de apontar as fontes de incerteza que têm maior influência no sistema.

α	Incerteza padrão combinada analiticamente a partir dos efeitos individuais das fontes de incerteza			Incerteza padrão resultante da influência simultânea de todas as fontes de incerteza		
	u_x	u_y	u_z	u_x	u_y	u_z
15°	$\pm 0,0112$	$\pm 0,0102$	$\pm 0,0655$	$\pm 0,0113$	$\pm 0,0100$	$\pm 0,0669$
18°	$\pm 0,0119$	$\pm 0,0105$	$\pm 0,0612$	$\pm 0,0115$	$\pm 0,0103$	$\pm 0,0599$
20°	$\pm 0,0119$	$\pm 0,0107$	$\pm 0,0530$	$\pm 0,0123$	$\pm 0,0106$	$\pm 0,0501$
25°	$\pm 0,0120$	$\pm 0,0108$	$\pm 0,0466$	$\pm 0,0120$	$\pm 0,0104$	$\pm 0,0473$

Tabela 6.4 : Análise comparativa dos valores de incerteza

A incerteza expandida foi calculada com grau de confiança de 95% e considerando 49 graus de liberdade (Anexo A.1), visto que incerteza padrão foi calculada a partir de 50 amostras de dados.

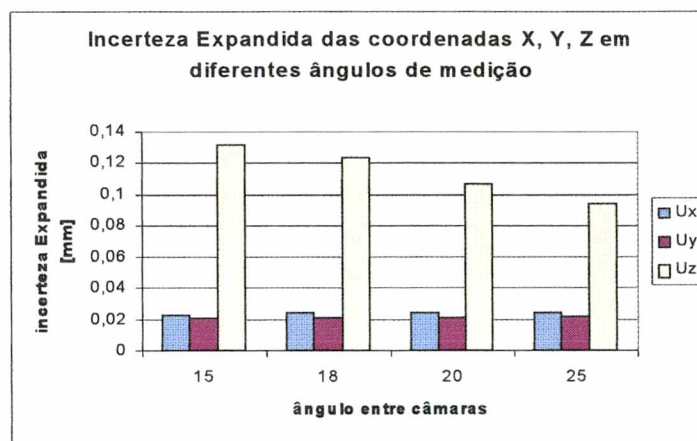


Figura 6.6 : Incerteza expandida das coordenadas para diferentes ângulos de medição

Os experimentos realizados para gerar as 50 amostras de dados limitaram-se ao intervalo angular de 15° a 25°. Este intervalo foi selecionado em função de não restringir demais a área submetida à medição que se reduz em função do aumento ângulo entre as câmaras.

A análise do comportamento do sistema frente a ângulos críticos de medição foi realizada através da simulação de dados experimentais.

6.4 Incerteza do sistema de medição frente a ângulos críticos

Ângulos muito abertos entre as duas câmaras dificultam a aquisição de dados para medição, o que praticamente inviabiliza a avaliação experimental do desempenho do sistema nesta condição. Para investigar o comportamento do sistema em uma ampla faixa de variação do ângulo entre as câmaras, dados foram numericamente simulados e analisados.

Os parâmetros de calibração utilizados na simulação respeitaram as condições de medição observadas em experimentos anteriores. A partir destes parâmetros as coordenadas dos centróides e dos pontos homólogos foram calculadas por simulação e vinte experimentos com o mesmo conjunto de dados foram simulados.

Foram introduzidas pequenas parcelas de erro aleatório às fontes de incerteza destes experimentos. Estes erros possuem magnitude da ordem da incerteza padrão estimada para cada uma das fontes de incerteza.

A análise foi feita através da média dos erros e desvio padrão médio calculados sobre cada uma das coordenadas dos pontos de referência do padrão de calibração. A média dos desvios padrão das coordenadas X, Y, Z foi utilizada para estimar a incerteza padrão das coordenadas.

O processo foi repetido com ângulos que variam de 1° a 160° entre as câmaras. A incerteza expandida obtida para as coordenadas X, Y, Z é mostrada graficamente a seguir :

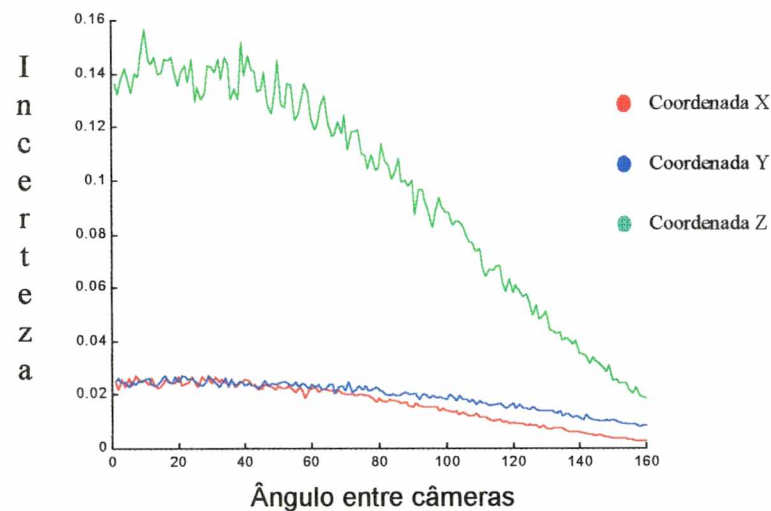


Figura 6.7 : Incerteza expandida x Ângulo entre câmaras

O gráfico mostra que a incerteza da coordenada Z, para distância de medição de 900 mm (distância entre objeto e câmaras utilizada na simulação), pode ser significativamente reduzida de acordo com o ângulo de medição, podendo chegar a valores de incerteza inferiores a 0,1 mm quando o ângulo entre as câmaras supera 90° .

A incerteza pode variar também de acordo com a distância de medição (distância entre câmaras e objeto): o aumento da distância de medição resulta no aumento da incerteza das coordenadas. Esta informação parece óbvia ao imaginar que pequenas distâncias (distâncias suficientes para focalização da imagem) implicam em uma imagem mais ampliada e nítida do objeto a ser medido.

O caso ideal de medição fica sendo caracterizado como aquele em que as câmaras se encontram suficientemente inclinadas e próximas do objeto de forma que ambas possam focalizar a mesma área submetida medição.

6.5 Validação metroológica do sistema de medição Topogramétrico

6.5.1 Medições de superfícies geométricas regulares

Alguns elementos geométricos conhecidos foram medidos para verificar as estimativas de incerteza efetuadas para o sistema de medição. Por tratarem-se de elementos de fácil caracterização, o plano e a esfera foram duas geometrias utilizadas nos testes de validação.

6.5.1.1 Plano

Uma superfície plana foi utilizada para verificar o desempenho do sistema Topogramétrico. A planeza desta superfície foi o parâmetro geométrico adotado para caracterizá-la. A Figura 6.8 mostra o plano medido no Sistema Topogramétrico (vermelho) e o plano médio gerado a partir dos dados medidos (azul).

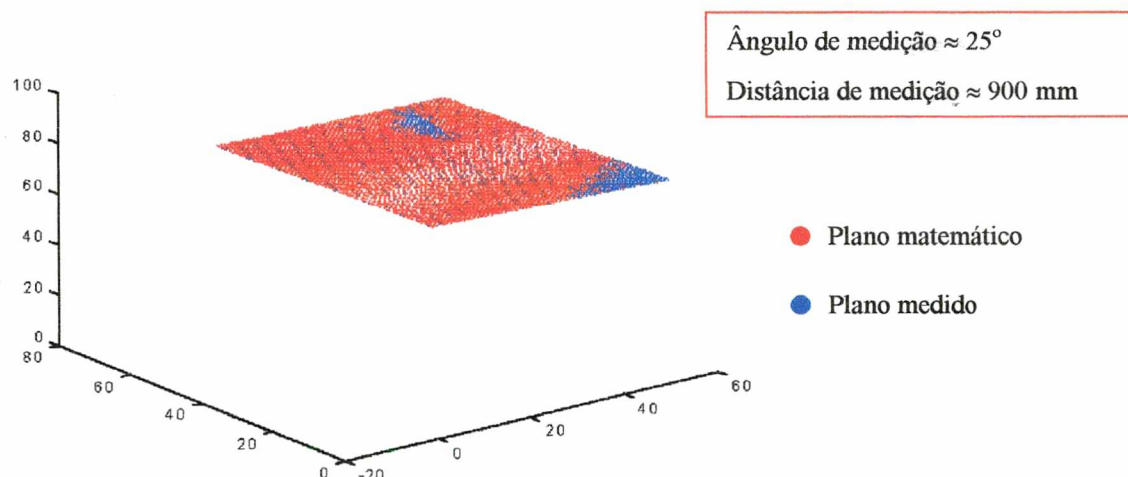


Figura 6.8 : Plano matemático x Plano medido

Cerca de 9000 pontos foram medidos pelo Sistema Topogramétrico e utilizados para determinar os coeficientes da equação do plano médio ($a.x+b.y+c.z=1$) através do método de ajuste por Mínimos Quadrados.

Três medições independentes foram realizadas para a avaliação do sistema, a Tabela 6.5 mostra o resultado da repetitividade na determinação dos coeficientes da equação do plano.

Plano	A	B	c	Erro máximo da interpolação	Erro mínimo da interpolação	Desvio padrão da interpolação
Medição 1	$9,147 \cdot 10^{-4}$	$5,975 \cdot 10^{-4}$	$118,882 \cdot 10^{-4}$	0,1335	-0,1534	$\pm 0,0342$
Medição 2	$9,154 \cdot 10^{-4}$	$5,979 \cdot 10^{-4}$	$118,882 \cdot 10^{-4}$	0,1297	-0,1600	$\pm 0,0336$
Medição 3	$9,130 \cdot 10^{-4}$	$5,981 \cdot 10^{-4}$	$118,881 \cdot 10^{-4}$	0,1369	-0,1470	$\pm 0,0345$
Valor médio	$9,144 \cdot 10^{-4}$	$5,978 \cdot 10^{-4}$	$118,881 \cdot 10^{-4}$	0,1334	-0,1535	$\pm 0,0341$
Desvio padrão (s)	$\pm 0,0123$	$\pm 0,0031$	$\pm 0,0006$	-----	-----	-----
Repetitividade ($t_{n=3}=4,30$)	$\pm 0,0529$	$\pm 0,0133$	$\pm 0,0025$	-----	-----	-----

Tabela 6.5 : Resultados da medição do plano

O desvio padrão dos pontos interpolados foi determinado a partir dos resíduos da interpolação para a coordenada Z e está estimado em $\pm 0,04$, este resultado é compatível com a incerteza padrão estimada à coordenada Z para uma medição nestas mesmas condições (Tabela 6.4).

Os erros mínimo e máximo de interpolação foram calculados levando em conta as diferenças entre todos os 9000 pontos medidos e a equação ajustada para o plano.

6.5.1.2 Esfera

A superfície de uma esfera foi medida no sistema Topogramétrico. O raio foi o parâmetro utilizado para caracterizar quantitativamente a esfera medida.

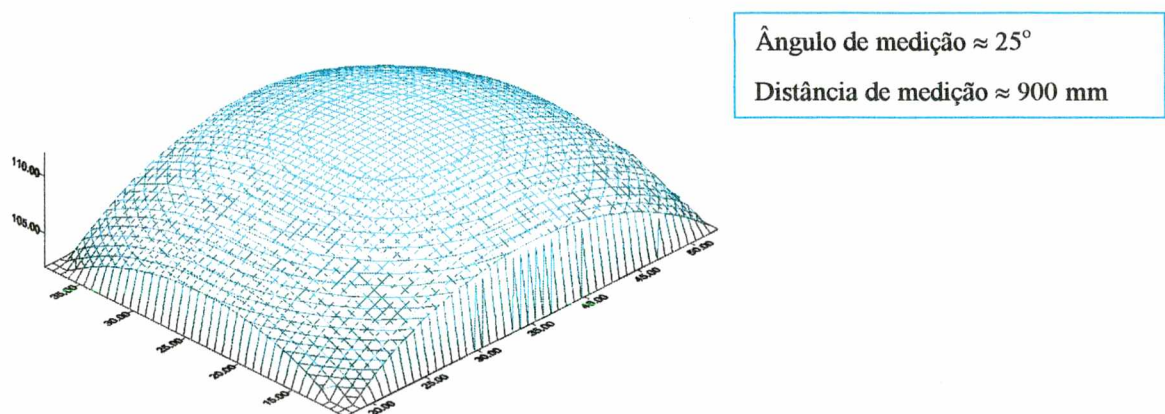


Figura 6.9 : Superfície de uma esfera medida no sistema Topogramétrico

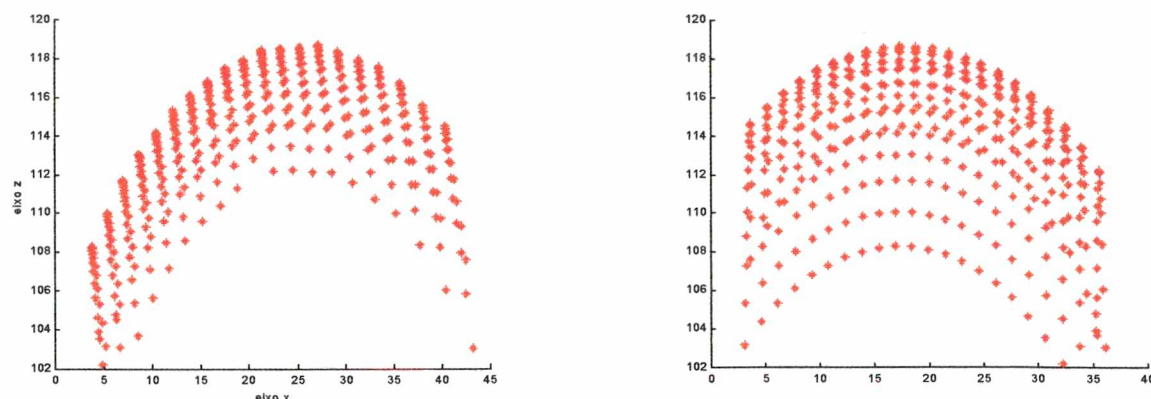


Figura 6.10 : Perfil da esfera medida no sistema Topográfico

O raio determinado pelo sistema Topográfico foi calculado através do ajuste da nuvem de pontos medida à equação de uma esfera média (matematicamente perfeita).

Cinco medições independentes foram realizadas, a Tabela 6.6 mostra os resultados.

Esfera	Raio da esfera medida	Erro máximo da interpolação	Erro mínimo da interpolação	Desvio padrão da interpolação
Medição 1	28,0433	0,0895	-0,1016	$\pm 0,0281$
Medição 2	28,1223	0,1174	-0,1529	$\pm 0,0303$
Medição 3	28,1305	0,1288	-0,1513	$\pm 0,0311$
Medição 4	28,1215	0,1138	-0,1221	$\pm 0,0299$
Medição 5	28,1371	0,1026	-0,1079	$\pm 0,0320$
Valor médio	28,1109	0,1104	-0,1272	$\pm 0,0303$
Desvio padrão (s)	$\pm 0,0388$	-----	-----	-----
Repetitividade ($t_{n-5}=2,776$)	$\pm 0,1078$	-----	-----	-----

Tabela 6.6 : Resultados da medição da esfera

A repetitividade das medições mostra que fatores externos não controlados, os quais não são observados nas medições da superfície plana, podem influenciar o resultado das medições. Em superfícies curvas, como a da esfera, o fator iluminação torna-se mais crítico.

Os erros mínimo e máximo de interpolação foram calculados levando em conta as diferenças entre todos os pontos medidos e a equação ajustada para a superfície esférica.

Tanto a repetitividade, quanto a dispersão dos raios calculados individualmente para cada ponto estão avaliando um mesmo parâmetro: o raio da esfera média. Sendo assim, a incerteza na determinação do raio fica estimada a partir destes valores, isto é, da ordem de 0,1 mm para o nível de confiança de 95%.

6.5.2 Avaliação das incertezas aleatórias

Ao medir as superfícies plana e esférica foram encontrados valores similares de dispersão dos pontos (desvio padrão da interpolação). Uma simulação foi realizada para avaliar se estes valores são coerentes com a incerteza previamente estimada para as coordenadas X, Y e Z (Tabela 6.3).

Uma esfera matematicamente perfeita, de raio 28 mm e centro (0,0,0), foi gerada por simulação. Cerca de 500 pontos foram calculados e a eles foram introduzidos erros aleatórios da ordem da incerteza padrão estimada para cada coordenada: erros na ordem de $\pm 0,01$ mm foram introduzidos às coordenadas X e Y e, da ordem de $\pm 0,05$ mm às coordenadas Z.

Os valores de incerteza foram retirados da Tabela 6.3 e são valores de incertezas estimados às coordenadas X, Y, e Z para medições realizada nas mesmas condições em que a esfera foi medida (distância de medição ≈ 900 mm e ângulo de medição $\approx 25^\circ$).

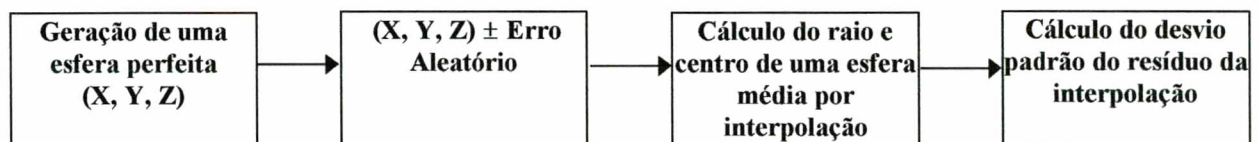


Figura 6.11 : Simulação para avaliação da parcela aleatória da incerteza

A análise feita com os dados experimentais foi repetida utilizando os dados simulados. A Tabela 6.7 mostra o resultado da análise.

Esfera	Raio da esfera medida	Erro máximo da interpolação	Erro mínimo da interpolação	Desvio padrão da interpolação
Medição 1	28,0011	0,0847	-0,1047	$\pm 0,0252$
Medição 2	28,9994	0,1132	-0,0893	$\pm 0,0282$
Medição 3	28,0010	0,0808	-0,0836	$\pm 0,0245$
Medição 4	27,9972	0,1489	-0,0796	$\pm 0,0260$
Medição 5	28,0001	0,1511	-0,1344	$\pm 0,0263$
Valor médio	27,9998	0,1157	-0,0983	$\pm 0,0260$
Desvio padrão (s)	$\pm 0,0016$	-----	-----	-----
Repetitividade ($t_{n=5}=2,776$)	$\pm 0,0045$	-----	-----	-----

Tabela 6.7 : Resultados da simulação da medição de uma esfera

Nota-se uma pequena redução nos valores estimados para o desvio padrão da interpolação. Este resultado não é surpreendente, visto que as medições simuladas não sofrem a influência de fatores externos.

Em relação aos resultados experimentais, os resultados da simulação mostram sensível redução (da ordem de 50%) nos valores do desvio padrão e na repetitividade do raio da esfera. Esta diferença indica que outros fatores não considerados na simulação podem ter influência expressiva nos resultados. Possivelmente alguns efeitos intensificados pela forma curva da superfície esférica, como as variações de visibilidade das franjas e da iluminação, tenham um efeito maior do que o que pode ser explicado apenas pelos erros aleatórios na medição das coordenadas X, Y e Z individualmente.

6.6 Resultados

A mesma esfera e plano utilizados nos experimentos foram medidos com uma máquina de medir por coordenadas. Os resultados obtidos por ambos sistemas foram reunidos na Tabela 6.8 :

Objeto	Elemento referência	Valor de referência medido em MMC (VVC)	Incerteza da medição em MMC (U_R)	Medição Topogramétrica (M_T)	Incerteza aleatória da medição Topogramétrica (U_{MT})	Intervalo de resultados comuns aos dois sistemas
Plano	Planeza	-----	$\pm 0,07$ mm	-----	$\pm 0,14$ mm	$\pm 0,07$
Esfera	Raio	28,06 mm	$\pm 0,03$ mm	28,11 mm	$\pm 0,08$ mm	$28,06 \pm 0,03$

Tabela 6.8 : Resultado das medições realizadas em MMC e no sistema Topogramétrico

Onde : $U_{MT} = t_n \cdot u_c$

A incerteza padrão dos parâmetros geométricos (raio e planeza) foram estimados a partir do desvio padrão médio dos resíduos das interpolações.

A parcela sistemática de incerteza das coordenadas X, Y e Z não foi considerada no cálculo de incerteza, observando a Tabela 4.1 que mostra os resultados de ensaios realizados com o padrão em diferentes posições. Nota-se que a parcela aleatória é significativamente maior que a sistemática (Tendência). Esta análise permite concluir que a parcela sistemática é desprezível frente a parcela aleatória, podendo, nesta análise, ser desconsiderada.



Figura 6.12 : Resultado de medição do plano obtido com a MMC (vermelho) e com o sistema Topogramétrico (azul)

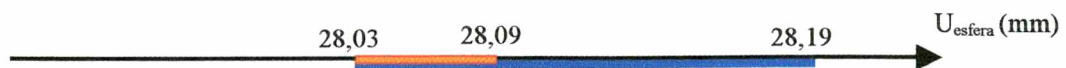


Figura 6.13 Resultado de medição da esfera obtido com a MMC (vermelho) e com o sistema Topogramétrico (azul)

A análise comparativa mostra que o resultado obtido com o sistema Topogramétrico abrange todo o intervalo de incerteza do sistema de referência, mais uma vez os testes confirmam que as incertezas das coordenadas X, Y e Z estão sendo razoavelmente bem estimadas.

A partir destes resultados afirma-se que a incerteza das coordenadas X, Y e Z pode ser generalizada de acordo com o ângulo e distância de medição utilizados. No caso deste trabalho, os testes foram baseados em uma tabela criada a partir de quatro experimentos, onde considerou-se uma distância fixa de medição e variou-se apenas o ângulo entre as câmaras (Anexo A.1).

A partir de experimentos realizados em diferentes ângulos e distâncias uma tabela completa de incertezas pode ser gerada, esta informação generaliza os valores de incerteza para as coordenadas em qualquer medição, uma estimativa segura das incertezas das coordenadas X, Y e Z pode ser obtida a partir desta tabela.

6.7 Aplicações do sistema

Formas livres foram medidas para demonstrar os resultados obtidos com o sistema de medição Topogramétrico. O programa Surfer foi utilizado para criação do modelo geométrico a partir da nuvem de pontos medidos.

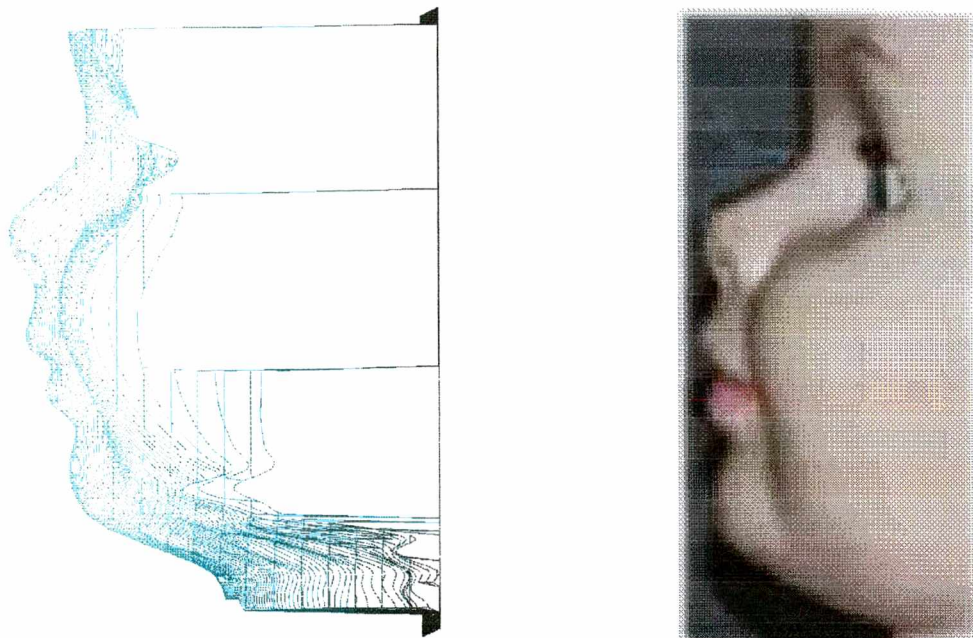


Figura 6.14 : Perfil de uma boneca medida no sistema Topogramétrico

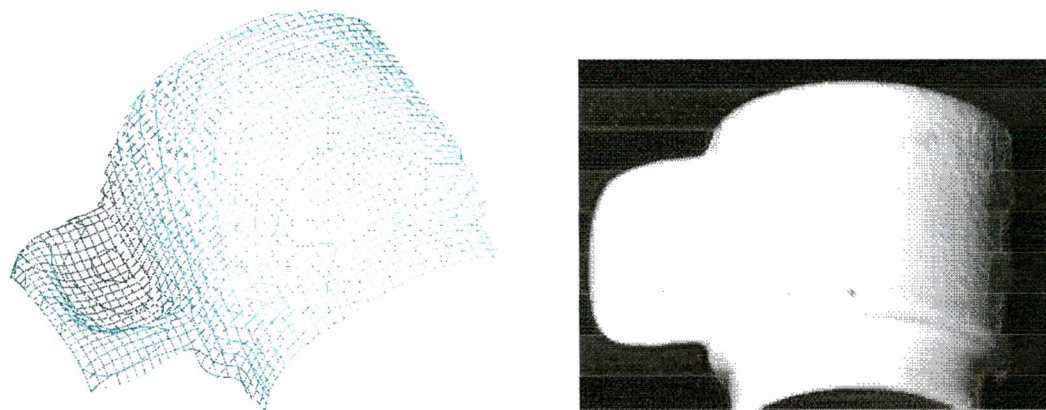


Figura 6.15 : Xícara medida no sistema Topogramétrico

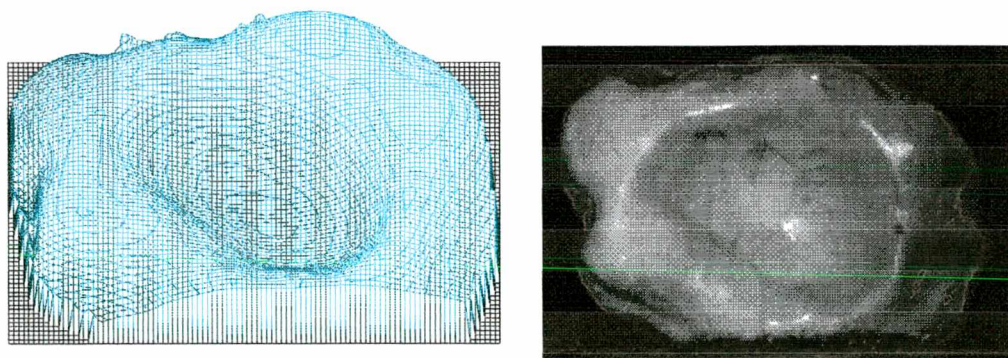


Figura 6.16 : Forma livre feita em argila medida no sistema Topogramétrico

CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES

Este trabalho buscou documentar alguns dos principais métodos óticos de medição de formas e detalhar a descrição da técnica Topogramétrica e sua implementação. A idéia de desenvolver um sistema baseado em Topogrametria surgiu com objetivo de reunir em único sistema características de técnicas fotogramétricas e de projeção de franjas através de um arranjo extremamente simples e barato.

A avaliação metrológica do sistema de medição topogramétrico, implementado através deste trabalho, permitiu que uma série de conclusões sobre esta técnica de medição de superfícies livres fossem formuladas. Algumas das conclusões são de caráter geral. Outras, são válidas apenas para a forma particular com que o sistema foi implementado, e apontam a direção a ser seguida para o seu aprimoramento.

A análise de incertezas realizada e os experimentos metrologicamente controlados revelaram que as principais fontes de incerteza do sistema topogramétrico são referentes à determinação dos pontos homólogos e à determinação das coordenadas dos centróides. As duas principais fontes de incerteza sofrem a influência da iluminação e do sistema ótico, tendo em vista que não foram observados erros sistemáticos na avaliação global. Atribui-se que a parcela aleatória seja causada principalmente pelos efeitos referente à estes componentes. Acredita-se conseguir uma redução na parcela aleatória de incerteza com uma iluminação controlada (homogênea).

O padrão de calibração apesar de representar menor influência na análise de incerteza do sistema, não deve ser desprezado. No início da fase experimental a falta de um padrão de calibração adequado mostrou que esta parcela de incerteza pode ser significativa se não for bem controlada. Com a construção de um padrão de calibração de qualidade (baixo erro de forma dos pinos e baixa incerteza na determinação das coordenadas) a incerteza referente a esta componente passa a ser quase desprezível, podendo ainda ser aprimorada com um padrão de alta qualidade.

Experimentos realizados com o sistema Topogramétrico evidenciaram a forte influência do ângulo entre as câmaras e a distância de medição sobre seu desempenho. Menores ângulos elevam a faixa de medição no eixo Z e pioram consideravelmente a incerteza para esta coordenada. Maiores ângulos entre as câmaras provocam o efeito inverso, mas tendem a dificultar

o processamento das imagens de superfícies com curvaturas pronunciadas, arestas ou descontinuidades.

Pela natureza implícita das equações que regem o sistema topogramétrico a estimativa das incertezas de medição não é uma tarefa trivial. A estratégia adotada neste trabalho, onde foram combinados dados de experimentos controlados com simulações numéricas, levaram a resultados confiáveis.

Experimentos mostraram que as incertezas atribuídas às coordenadas estão sendo corretamente estimadas. Testes utilizando geometrias conhecidas vieram a reforçar esta conclusão, visto que o intervalo de confiança dos resultados obtidos com o sistema de medição Topogramétrico possui valores comuns ao intervalo de confiança das medições de referência.

Finalmente, conclui-se que a incerteza das coordenadas pode ser suficientemente bem estimada por meio de tabelas e gráficos obtidos para experimentos controlados realizados em diferentes ângulos e distâncias de medição.

Infelizmente a Topogrametria carrega as limitações encontradas nas técnicas de Projeção de Franjas e Fotogrametria. Peças espelhadas, transparentes ou de cor muito escura, assim como peças que possuem furos ou descontinuidades tornam-se críticas quando medidas em sistemas deste tipo. Recomenda-se a utilização do sistema de medição Topogramétrico na medição de formas livres onde a principal preocupação é o tempo e o custo da medição.

Este trabalho foi desenvolvido a nível experimental, porém abre caminho para outros projetos relacionados à medições de formas por sistemas óticos. Melhorias no algoritmo de cálculo e processamento dos mapas de fase que tornassem possível a medição de peças com furos e outras formas críticas eliminaria algumas limitações presentes no sistema. A automatização do deslocamento de fase, da aquisição das imagens e do reconhecimento dos centróides na imagem seria uma forma de reduzir o tempo de medição. A saída de dados em uma forma padronizada, como por exemplo arquivos *.DXF, possibilitaria ao usuário trabalhar diretamente em sistemas CAD. Por último, concatenação de resultados de diferentes medições topogramétricas poderiam ainda expandir a utilização do sistema para medições completas de uma peça.

Estas últimas observações sugerem algumas possibilidades de transformar este trabalho experimental em um sistema flexível e compatível com a maioria das aplicações nas áreas de engenharia.

CAPÍTULO 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Takasaki, H. **"Moiré Topography"** Applied Optics, v. 12, p. 845-850, 1973.
- [2] Ligtenberg, F. K. **"The Moiré Method"** Proc. Soc. Exp. Stress Anal. (SESA), v. 12, p. 83-98, 1955.
- [3] Kafri, O., I. Glatt. **"The Physics of Moire Metrology"** John Wiley & Sons, USA, 1990.
- [4] Hariharan, P. **"Applications of Interferogram Analysis"**. Interferogram Analysis, Cap. 8, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1993.
- [5] Göpel, W.; Hesse J.; Zemel, J. N. **"Optical Sensors"**. Sensors, v. 6, 1992.
- [6] Jais, S. **"Investigations on Optical 3D Measurements Techniques and Implementation of an Optical Range sensor"**. Tese de Doutorado, Johannes Kepler Universität Linz, 1997.
- [7] Gäsvik, K. J. **"Optical Techniques. In : Interferogram Analysis"**. Interferogram Analysis, Cap. 2. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1993.
- [8] Press, W. H. et al. **"Numerical Recipes in C"** Cambridge University Press, 1995.
- [9] Albertazzi Jr. A. **"Análise de Mapas de Franjas"**. Apostila Complementar ao curso de Análise experimental de Tensões, CPGEM-UFSC, 1991.
- [10] Russ, J. C. **"The Image Processing Handbook"**. CRC Press Inc, Florida, 2th edition, 1994.
- [11] Creath, K. **"Temporal Phase Measurement Methods"**. Interferogram Analysis, Cap. 4, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1993.
- [12] Robinson, D. W. **"Phase Unwrapping Methods"** Interferogram Analysis, Cap. 6, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1993.
- [13] Loch, C.; Lapolli E. M. **"Elementos básicos da fotogrametria e sua utilização prática"** Ed. UFSC, 4^o edição, Florianópolis, 1998.
- [14] Cylan 3D, <http://www.pr-steyr.ac.at/~sjais/personal/da/node36.htm#sec:intecu> (1997).
- [15] Atos, <http://www.pr-steyr.ac.at/~sjais/personal/da/node36.htm#sec:atos> (1997).
- [16] Bergmann, D.; Galanulis K.; Winter D. **"Advanced 3D- Fringe-Projection-Systems"**. Fringe'97, p. 432-442, 1997.
- [17] Fantin, A. V., et al. **"Topogrametry : A Pratical Tool for Geometrical Modelling"**. 5th IFAC-Workshop on Intelligent Manufacturing Systems. Gramado, RS, pp 381-386, 1998.

- [18] De Luca, J. C. **“Medição de Coordenadas Tridimensionais através da Digitalização de Imagens”**. Dissertação de Mestrado, UFSC, 1990.
- [19] Jain, R.; Kasturi R.; Schunck. B. G. **“Machine Vision”**. McGraw-Hill Inc., USA.
- [20] Cohu serie 4810, <http://www.cohu.com/cctv/4800.htm>
- [21] Marquardt, D. W. **“An Algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters”**. J. Soc. Indust. Appl. Math., v. 11, No. 2, p. 431-441, 1963.
- [22] Schreiber, W.; et al. **“Managing some calibration problems in fringe projection shape measurement systems”**. Fringe’97, p. 443-450, 1997.
- [23] Bacakoglu, H.; Kamel M. S. **“A Three Step Camera Calibration Method”** IEEE Trans. Instrum. Meas, v. 46, No 5, p. 1165-1172, 1997.
- [24] Microsoft. **“Language Reference of Microsoft Visual Basic”** Microsoft Corporation, 1995.
- [25] Surfer versão 6.04 (1996). Golden Software, Inc.
- [26] Sutério, R. **“Caracterização de Constantes Elásticas de Materiais Isotrópicos por Holografia Óptica Eletrônica combinada ao Método de Ressonância Mecânica”**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, UFSC, 1998.
- [27] Montgomery, D. C. **“Design and Analysis of Experiments”** John Wiley & Sons, USA, 4th edition, 1997.

ANEXOS

A Tabelas de resultados de medições

A.1 Tabela de repetitividade do sistema Topogramétrico

Para analisar o comportamento do sistema foram calculados os desvios padrão dos erros das coordenadas do padrão de calibração em 5 experimentos. A repetitividade foi calculada com 95% de confiança ($t \approx 2,8$).

Distância de medição ≈ 900 mm

Ângulo entre câmaras $\approx 20^\circ$

Pontos	s_x	s_y	s_z	Repetitividade (s.t)		
Ponto 1	$\pm 0,0009$	$\pm 0,0011$	$\pm 0,0024$	$\pm 0,0025$	$\pm 0,0031$	$\pm 0,0067$
Ponto 2	$\pm 0,0016$	$\pm 0,0027$	$\pm 0,0103$	$\pm 0,0045$	$\pm 0,0076$	$\pm 0,0288$
Ponto 3	$\pm 0,0013$	$\pm 0,0021$	$\pm 0,0077$	$\pm 0,0036$	$\pm 0,0059$	$\pm 0,0216$
Ponto 4	$\pm 0,0023$	$\pm 0,0008$	$\pm 0,0054$	$\pm 0,0064$	$\pm 0,0022$	$\pm 0,0151$
Ponto 5	$\pm 0,0019$	$\pm 0,0034$	$\pm 0,0051$	$\pm 0,0053$	$\pm 0,0095$	$\pm 0,0143$
Ponto 6	$\pm 0,0025$	$\pm 0,0034$	$\pm 0,0064$	$\pm 0,0070$	$\pm 0,0095$	$\pm 0,0179$
Ponto 7	$\pm 0,0027$	$\pm 0,0013$	$\pm 0,0108$	$\pm 0,0076$	$\pm 0,0036$	$\pm 0,0302$
Ponto 8	$\pm 0,0016$	$\pm 0,0034$	$\pm 0,0077$	$\pm 0,0045$	$\pm 0,0095$	$\pm 0,0216$
Ponto 9	$\pm 0,0021$	$\pm 0,0035$	$\pm 0,0083$	$\pm 0,0059$	$\pm 0,0098$	$\pm 0,0232$
Ponto 10	$\pm 0,0029$	$\pm 0,0024$	$\pm 0,0094$	$\pm 0,0081$	$\pm 0,0067$	$\pm 0,0263$
Ponto 11	$\pm 0,0017$	$\pm 0,0013$	$\pm 0,0074$	$\pm 0,0048$	$\pm 0,0036$	$\pm 0,0207$
Ponto 12	$\pm 0,0020$	$\pm 0,0015$	$\pm 0,0098$	$\pm 0,0056$	$\pm 0,0042$	$\pm 0,0274$
Ponto 13	$\pm 0,0009$	$\pm 0,0011$	$\pm 0,0031$	$\pm 0,0025$	$\pm 0,0031$	$\pm 0,0087$
Média	$\pm 0,0019$	$\pm 0,0021$	$\pm 0,0072$	$\pm 0,0053$	$\pm 0,0060$	$\pm 0,0202$

Tabela A.1: Repetitividade do Sistema

A.2 Incerteza expandida x Ângulo de medição

Ângulos de medição	Incerteza expandida das Coordenadas 3D		
	U_x	U_y	U_z
15°	±0,0225	±0,0205	±0,1316
18°	±0,0239	±0,0211	±0,1230
20°	±0,0239	±0,0215	±0,1065
25°	±0,0241	±0,0217	±0,0936

Tabela A.2 : Incerteza expandida x ângulo de medição

B Sensores óticos

A seguir está apresentada uma lista de alguns sensores disponíveis comercialmente na Europa e América do Norte. Essa lista está disponível na internet no endereço :

<http://www.iware.com/htmls/scanners.html>

B.1 Europa

B.1.1 3D scanners, Ltd.: 90. London Road SE1 6LN, London

United Kingdom

(44)-1719228822

B.1.2 3D Research, Ltd. : Huddersfield Road S75 IJL, Barnsley

United Kingdom

(44)-1226249590

B.1.3 Bertin: BP 22000 Aix-en-Provence 13791

France

(33)-1642604600

B.1.4 Breuckmann GmbH: Tosenstrasse 13, 7758 Meersburg

Germany

(49)-75329623

B.1.5 gom: Gesellschaft für optische Meßtechnik: Rebenring 33, 38106 Braunschweig

Germany

(49)-531-3804330

B.1.6 Intecu GmbH : Kepplerstrasse 48, 07549 Gera

Germany

(49)-36571006961

B.1.7 Kreen Industry: Rue N. Appert BP 1565, 87022 Limoges

France

(33)-55388162

B.1.8 Krypton : Leuven Research Park, 3001 Leuven

Belgium

(32)-16 400410

B.1.9 Lemoine as : Rue du Dragon 34, Paris 75006

France

(33)-142224304

B.1.10 Massen Gmbh: Am Scerhein 8, Konstanz

Germany

(49)-753157502

B.1.11 Microdenta Gmbh: Rungestrasse 20, 10179 Berlin

Germany

(49)-3030866915

B.1.12 Scan Technology: Harhoffs Alle 12^A, Ringsted 4100

Denmark

(45)-53618489

B.1.13 Steinbichler Gmbh: Am Bauhof 4, 83115 Neubeuern

Germany

(49)-803587040

B.1.14 Wolf & Beck: Seestrasse 9, 73099 Adelberg

Germany

(49)-716650350

B.2 América do Norte

B.2.1 3D Technology, Inc.: 12 Cambridge Drive, Trumbull, CT 06611

(203) 371-8500

B.2.2 CyberOptics Corporation: 2505 Kennedy Street NE

Minneapolis, MN 55413

(612) 331-5702

B.2.3 Cyberware Laboratory, Inc.: 2110 Del Monte Avenue

Monterey, CA 93940-3797

(408) 657-1481

- B.2.4 Digibotics, Inc.: 2800 Longhorn Blvd., Suite 102
Austin, TX 78759
(512) 832-6544
- B.2.5 Electro Optical Information Systems (EOIS): 710 Wilshire Blvd., Suite 501
Santa Monica, CA 90401
(310) 451-8566
- B.2.6 Faro Technologies, Inc., Industrial Division: 125 Technology Park
Lake Mary, FL 32746-6204
(800) 736-0234
- B.2.7 Hymarc, Ltd.: 5-35 Auriga Drive, Ottawa, Ontario
Canada K2E 8A5
(613) 727-1584
- B.2.8 Lemoine: 6400 Farmington Road
West Bloomfield, MI 48322
(810) 661-3234
- B.2.9 Medar: 38700 Grand River Ave.
Farmington Hills, MI 48335-1563
(810) 472-3900
- B.2.10 Perceptron: 23855 Research Drive
Farmington Hills, MI 48335
(810) 478-7710
- B.2.11 Pixsys: 1727 Conestoga Street
Boulder, CO 80301
(303) 447-0248
- B.2.12 Polhemus: P. O. Box 560
Colchester, VT 05446
(802) 655-3159
- B.2.13 Renishaw, Inc.: 623 Cooper Court
Schaumburg, IL 60173
(708) 843-3666

B.2.14 Romer Supratech, Inc.: 5145 Avenida Encinas

Carlsbad, CA 92008

(619) 438-1725

B.2.15 Science Accessories Corporation: 2 Research Drive, P.O.Box 825

Shelton, CT 06484-0825

(203) 925-1661

B.2.16 Scientific Measurement Systems: 2209 Donley Drive

Austin, TX 78758

(512) 837-4712

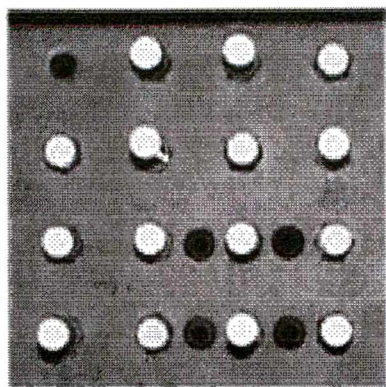
B.2.17 Sharnoa Corporation: 45901 5-Mile Road

Plymouth, MI 48170

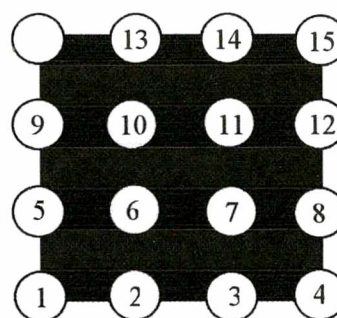
(313) 454-7192

C Especificação dos componentes utilizados pelo sistema Topogramétrico

C.1 Padrão de calibração



Fotografia do padrão de calibração



Sequência de aquisição dos pontos na imagem.

Pontos	Coordenadas dos pontos de referência medidas em uma máquina Zeiss modelo UPM 550		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	0,0001	0,0010	47,6636
2	24,781	0,0546	12,4804
3	49,938	-0,0008	48,1526
4	75,073	-0,5866	33,7656
5	0,1200	25,4938	23,0850
6	25,368	25,5480	27,6425
7	50,258	24,6524	38,0574
8	75,678	24,2393	23,5304
9	0,6240	50,8119	12,3844
10	25,581	50,2143	47,9588
11	50,873	49,8104	18,2831
12	75,598	49,2325	37,5316
13	25,752	75,1582	33,9766
14	50,835	74,8665	37,4502
15	76,230	73,9834	13,9252

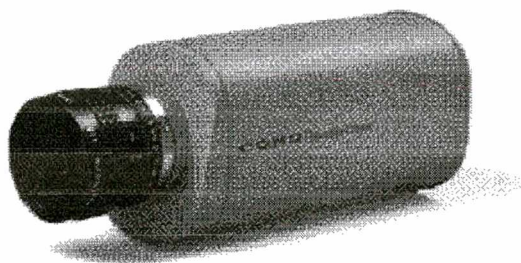
Tabela C.1 : Coordenadas do padrão de calibração

C.2 Câmaras CCD

As câmaras utilizadas são da marca Cohu serie 4810.

Os dados técnicos da câmara podem ser encontrados na internet no endereço :

<http://www.cohu.com/cctv/4800.htm>

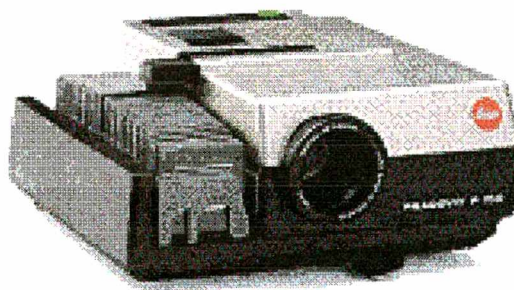


Câmera Cohu serie 4810

C.3 Projetor

O projetor utilizado pelo sistema de medição é da marca Leica modelo PRADOVIT P150.

Os dados técnicos do equipamento, assim como o catálogo do fabricante podem ser encontrados no endereço : http://www.leica-camera.com/pradovit/p150_e.htm



Projetor Pradovit Leica P150